



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Caracterización Radioeléctrica del
Entorno Acuático para el Despliegue
de Redes WPAN y WSN en el Surf

Master en Comunicaciones

Hisham Baghdadi Gonzalez
Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

**Este trabajo va dedicado a todo mi entorno familiar y profesional
que me ha apoyado hasta ahora, y lo seguirá haciendo siempre.
¡¡¡Muchas gracias a todos!!!**

“La diferencia entre el pasado, el presente y el futuro es sólo una ilusión persistente.”

Albert Einstein

Resumen

En este trabajo, la propagación radio para sistemas inalámbricos embebidos en tablas de surf se ha caracterizado con el objetivo de poner a prueba la calidad de la comunicación entre un surfista y una boya en ambientes acuáticos, por medio de Redes Inalámbricas de Área Personal con una tecnología de transporte. En el surf, asegurar la calidad del canal radio es un reto, debido al agua, la rugosidad de la superficie y la presencia del cuerpo humano que pueden causar el mal funcionamiento de un sistema. Apoyado por el Método de Trazado de Rayos en 3D desarrollado, que fue validado por medidas empíricas en un trabajo previo, los resultados de simulación determinísticos se han empleado para ver los efectos del alto número de componentes multitrayecto generados en este contexto. La adopción de técnicas de planificación radio precisas puede ayudar en el despliegue nuevas soluciones inalámbricas rentables y eficientes y con una ubicación de la antena topológicamente óptima, de aplicación al surf pero extensible a otros deportes y aplicaciones acuáticos.

Abstract

In this work, the radio propagation for wireless systems embedded in surfboards has been characterized with the aim of testing the quality of a surfer to buoy communication in aquatic environments, by means of Wireless Personal Area Networks combined with an adequate transport technology. In surfing, assurance of radio channel quality is challenging, owing to water, surface roughness and presence of human body that may cause the malfunction of a system. Supported by in house developed 3D Ray Launching Method, which was validated by empirical measurements in a previous work, deterministic simulations results have been employed to see the effects of the high number of multipath components generated in this context. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective new wireless solutions and topologically optimal antenna location, applied to surfing and extendable to other aquatic sports and applications.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	10
3. ESTADO DEL ARTE	11
3.1. Canal radioeléctrico	11
3.1.1. Propiedades dieléctricas del agua	11
3.1.2. Pérdidas de propagación en espacio libre	12
3.1.3. Fenómenos físicos de propagación.....	12
3.1.4. Desvanecimiento por multitrayectoria.....	17
3.2. Redes de área personal (WPAN) y corporal (WBAN)	18
3.2.1. Introducción.....	18
3.2.2. Redes de sensores inalámbricas (WSN)	19
3.2.3. Bluetooth (IEEE 802.15.1)	22
3.2.4. ZigBee (IEEE 802.15.4)	26
3.2.5. Identificación por Radiofrecuencia (RFID)	35
3.3. Trabajos relacionados con la materia	53
4. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	56
4.1. Introducción	56
4.2. Comportamiento del sistema en campo cercano	56
4.3. Metodología y parámetros.....	58
4.4. Modelado de una superficie rugosa.....	60
4.5. Escenarios de simulación	64
4.5.1. Escenario 1.....	64
4.5.2. Escenario 2.....	68
4.5.3. Escenario 3.....	71
4.6. Pérdidas por difracción	75
5. CONCLUSIONES.....	77
6. LÍNEAS FUTURAS	78
7. BIBLIOGRAFÍA.....	79
8. ANEXOS	81
8.1. Código RL-3D	81

8.1.1.	crearescenarioTablaPersonaDepie.m	81
8.1.2.	refraccionobjetosuperficierrugosa.m.....	83
8.2.	Herramientas utilizadas	90
8.2.1.	Hardware	91
8.2.2.	Software.....	92
9.4.	Publicaciones	95

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Algunos de los resultados obtenidos en el proyecto anterior.	10
Fig. 3.1. Permitividad relativa (ϵ_r) y conductividad (σ) en función de la frecuencia para distintas superficies [1].....	11
Fig. 3.2. Profundidad de penetración (δ) para distintas frecuencias y superficies [1].....	13
Fig. 3.3. Absorción del cuerpo humano.	13
Fig. 3.4. Reflexión y refracción en la frontera entre dos medios distintos [6].....	14
Fig. 3.5. Principio de Huygens.	15
Fig. 3.6. Definición de las zonas de Fresnel [7].	15
Fig. 3.7. Fase del campo producido por cada una de las fuentes secundarias sobre el receptor [7].	16
Fig. 3.8. Dispersión de una señal transmitida [8].....	17
Fig. 3.9. Propagación multitrayectoria.....	17
Fig. 3.10. Arquitectura de un nodo.	19
Fig. 3.11. Logotipo Bluetooth [9].	22
Fig. 3.12. Transceptor Bluetooth.	24
Fig. 3.13. Protocolos Bluetooth [9].	24
Fig. 3.14. Perfiles Bluetooth [9].	25
Fig. 3.15. Topologías de red Bluetooth [9].....	26
Fig. 3.16. Logotipo ZigBee Alliance [11].	27
Fig. 3.17. Arquitectura de la especificación ZigBee [11].	27
Fig. 3.18. Estructura de canales [12].....	29
Fig. 3.19. Topología de red en estrella (a), en malla (b) y en árbol (c).	32
Fig. 3.20. Capa de aplicación [11].	32
Fig. 3.21. Módulo XBee de la Serie 2 [13].	34
Fig. 3.22. Esquema de funcionamiento de un sistema RFID pasivo [15].	36
Fig. 3.23. Esquema de un transpondedor de RFID [15].	37
Fig. 3.24. Ejemplos de etiquetas RFID comerciales.....	40
Fig. 3.25. Diagrama de bloques de un lector RFID [15].....	41
Fig. 3.26. Lector móvil Motorola MC3190-Z [17] (izquierda) y lector fijo Intermec IV7 [18] (derecha). .	42
Fig. 3.27. Impresora RFID Zebra ZM400 [19].	43
Fig. 3.28. Comunicación en modo pasivo [22].	49
Fig. 3.29. Comunicación en modo activo [22].....	50
Fig. 3.30. Esquema de los estándares empleados por NFC.	52
Fig. 3.31. Estructura del mensaje NDEF [22].....	52
Fig. 3.32. Despliegue de una red de sensores en el océano (izquierda) [27] y bajo el agua (derecha) [30].....	53
Fig. 3.33. Tabla Surfsens [33].	54
Fig. 3.34. Red de sensores embebidos en una tabla de surf [34].	54
Fig. 3.35. Ambos lados de la placa electrónica sobre la que está montada todo el sistema [35].	55
Fig. 3.36. Esquema de la patente US 7166005 B2 [37].	55
Fig. 4.1. Propagación del campo eléctrico a 868MHz y a 2.4GHz.	57
Fig. 4.2. Variación de la intensidad del campo eléctrico con la frecuencia a en los puntos marcados de la imagen derecha.....	58

Fig. 4.3. Ejemplo de escenario interior en 3D con los rayos lanzados desde un transmisor en el centro.	58
Fig. 4.4. Ejemplo de mapa de potencia recibida.	59
Fig. 4.5. Modelo de surfista: vista tridimensional (izquierda) y aérea (derecha).	59
Fig. 4.6. Boya marítima: modelo Matlab (izquierda) y real (derecha).	60
Fig. 4.7. Escenario de pruebas con suelo de agua (izquierda) y con obstáculo de agua (derecha).	61
Fig. 4.8. Mapas de cobertura en el plano XZ para distintos valores de σ_h .	63
Fig. 4.9. Radiales de potencia a la altura del transmisor para distintos valores de σ_h .	64
Fig. 4.10. Primer escenario de simulación.	65
Fig. 4.11. Planos XY (a) y XZ (b) del escenario junto con la distancia Tx-Rx calculada por trigonometría.	65
Fig. 4.12. Mapas de cobertura a una altura de 2m variando la altura de las olas cada 10cm.	67
Fig. 4.13. Radiales de potencia variando la altura de las olas y sensibilidades de referencia.	68
Fig. 4.14. Segundo escenario de simulación.	69
Fig. 4.15. Mapas de cobertura a una altura de 2m reduciendo la distancia de separación entre la tabla de surf y boya 10m cada vez.	70
Fig. 4.16. Radiales de potencia para distintas distancias de separación entre transmisor y receptor.	71
Fig. 4.17. Tercer escenario de simulación.	72
Fig. 4.18. Mapas de cobertura a una altura de 1m variando la altura de las olas cada 10cm.	74
Fig. 4.19. Radiales de potencia variando la altura de las olas, y las sensibilidades de referencia.	74
Fig. 4.20. Representación de la primera región de Fresnel.	75
Fig. 4.21. Aproximación de obstáculo aislado en arista en filo de cuchillo [38].	76
Fig. 8.1. Ordenador Lenovo ThinkStation D20.	91
Fig. 8.2. Ordenador portátil Lenovo U410.	91
Fig. 8.3. Matlab de MathWorks.	92
Fig. 8.4. CST Studio Suite.	93
Fig. 8.5. SigmaPlot 12.	93
Fig. 8.6. Microsoft Word 2013.	94
Fig. 8.7. Microsoft Excel 2013.	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros de modulación [12].	28
Tabla 3.2. Modos de funcionamiento y principales características.	37
Tabla 3.3. Protocolos definidos por la organización EPCGlobal [16].	40
Tabla 3.4. Estándares ISO/IEC para RFID [20].	47
Tabla 3.5. Estándar ISO/IEC - Serie 18000 [20].	47
Tabla 3.6. Tipos de etiquetas definidas por el NFC Forum [22].	49
Tabla 4.1. Materiales utilizados y sus propiedades eléctricas.	60
Tabla 4.2. Influencia de las pérdidas de difracción por obstrucción.	76

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la rápida evolución de las tecnologías inalámbricas y la microelectrónica han transformado notablemente las telecomunicaciones de hoy en día, al producir dispositivos más pequeños, de bajo precio y consumo que favorecen la aparición de multitud de aplicaciones que despliegan redes de área personal y corporal. Esto, unido al amplio uso y desarrollo de sensores de cualquier tipo y al gran auge de los terminales *wearable*, hacen de este sector uno de los de mayor interés actualmente y al que le queda mucho futuro por delante.

En este sentido, es el ámbito deportivo uno de los cuales más ha invertido en investigación e innovación de tecnología y comunicaciones, ya no sólo en deportes que cuentan con un elevado presupuesto, como el automovilismo o el motociclismo, sino también en otros crecientes como el *running*. Sin embargo, cuando la práctica deportiva se sitúa en un medio acuático el nivel de implantación tecnológica disminuye bastante.

Además, hay que tener en cuenta que los deportes acuáticos, y el surf más concretamente, dispone de una gran cantidad de competiciones y cada año gana más adeptos, lo que se traduce en una clara oportunidad para investigar y ser pionero en un sector con escaso nivel de desarrollo tecnológico.

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Este trabajo nace con la finalidad de profundizar en mi proyecto previo que, bajo el título “*Diseño y Análisis de un Sistema Basado en un Transceptor Inalámbrico Embebido en una Tabla de Surf*”, estimaba de forma rigurosa el radio de cobertura en un enlace de comunicaciones inalámbrico entre una persona y una tabla de surf, situando el transmisor embebido en la propia tabla.

En este caso se demostró la viabilidad del sistema analizando el impacto que podría tener el entorno exterior complejo en el radioenlace y comprobando las limitaciones existentes al considerar diversos parámetros como la frecuencia de trabajo, la posición del surfista, el material de la tabla, el tipo de agua o el estado de la piel de la persona (si está seca o mojada). Para ello se empleó un algoritmo de trazado de rayos en 3D implementado en Matlab y que fue completamente validado por medio de una serie de medidas empíricas RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Además se realizaron medidas PER (*Packet Error Rate*) para comprobar la calidad del radioenlace.

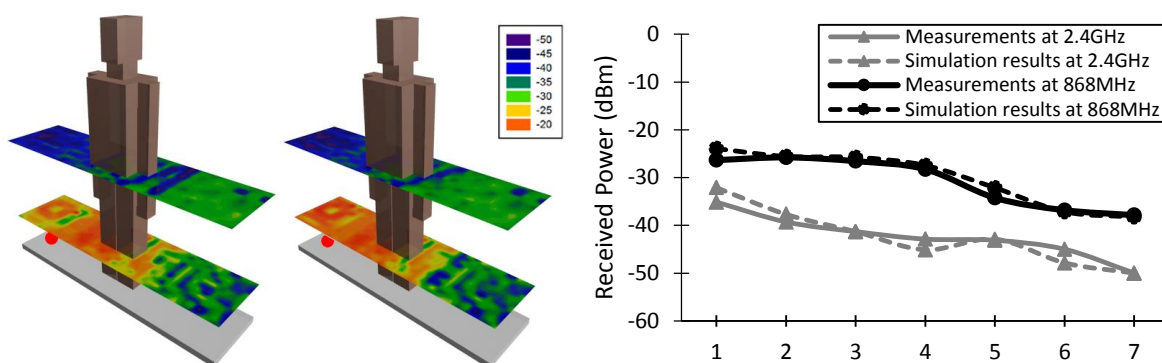


Fig. 2.1. Algunos de los resultados obtenidos en el proyecto anterior.

Con los resultados obtenidos y una vez validado el código, el presente trabajo trata de ir más allá y tiene como principal objetivo observar el comportamiento del canal radioeléctrico al aumentar considerablemente la distancia entre transmisor y receptor, estableciendo, por ejemplo, una radiocomunicación entre un surfista y una boya marítima, con la vista puesta en el despliegue de una red de sensores (WSN) cuyas aplicaciones en ese ámbito pueden ser muy numerosas.

Para cumplir los objetivos propuestos el resto de la memoria se estructura de la siguiente manera. Primero se dará una visión general sobre el estado del arte, en donde se explicará la problemática del medio, se describirán las tecnologías más destacadas en lo que a redes inalámbricas de área personal (WPAN) y corporal (WBAN) se refieren, y se comentarán brevemente los trabajos de mayor relevancia que han tenido lugar en este campo. En segundo lugar se desarrollará el proyecto realizado, definiendo claramente la técnica y los escenarios utilizados para posteriormente analizar los resultados correctamente. Para terminar se enumerarán las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de trabajo.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Canal radioeléctrico

3.1.1. Propiedades dieléctricas del agua

Las propiedades eléctricas del agua, al igual que en cualquier otro medio material, hacen que sea posible la caracterización del comportamiento de las señales electromagnéticas cuando inciden en este medio o se propagan a través de él. Estos parámetros intrínsecos, que típicamente se corresponden con la permitividad relativa (ϵ_r), y la conductividad (σ) o la tangente de pérdidas ($\tan\delta$), suele tener una importante dependencia con la frecuencia de dichas señales [1]. En la Fig. 3.1 se puede ver la evolución de estos valores para distintas superficies. Concretamente para el caso del agua, se observa como a altas frecuencias disminuye la constante dieléctrica aumentando la conductividad, lo que produce un claro efecto en los fenómenos físicos de propagación que pueden aparecer y afectar gravemente al enlace de comunicaciones [2]-[5].

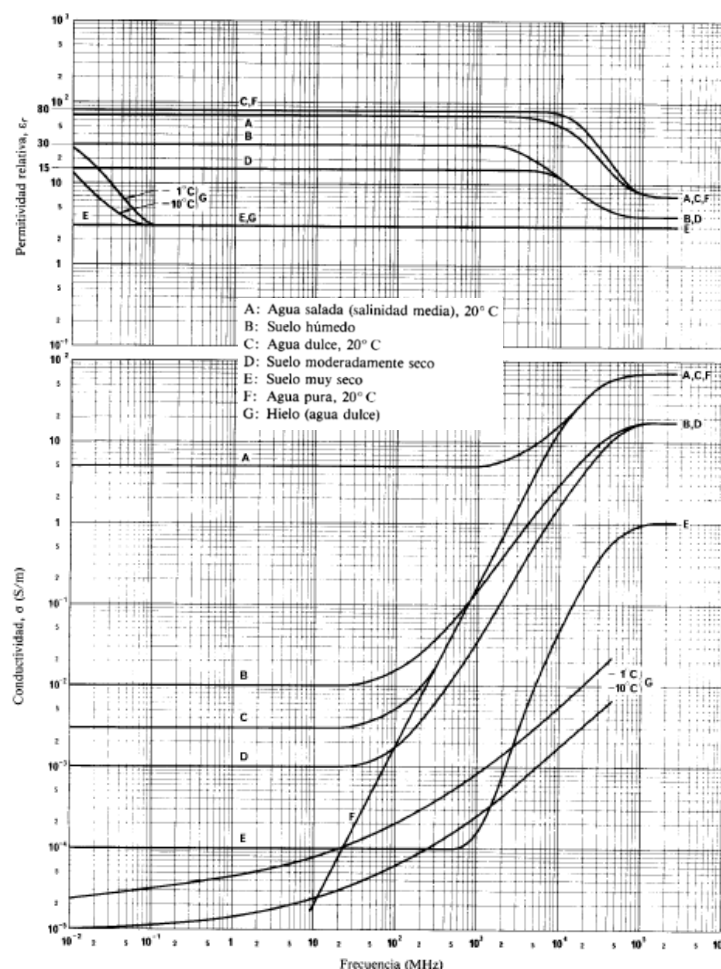


Fig. 3.1. Permittividad relativa (ϵ_r) y conductividad (σ) en función de la frecuencia para distintas superficies [1].

3.1.2. Pérdidas de propagación en espacio libre

El modelo de propagación LOS (*line-of-sight* ó línea de vista, en castellano) se utiliza para predecir el nivel de potencia recibido en cierta ubicación cuando no existe ningún objeto obstaculizando el enlace directo entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx). Este modelo predice que la potencia transmitida disminuye en función de la separación, d , entre transmisor y receptor, de acuerdo a la ecuación de Friis:

$$P_r(mW) = P_t(mW)G_{Tx}G_{Rx}\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

Donde P_t es la potencia transmitida, $P_r(d)$ es la potencia recibida, G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, d es la separación Tx-Rx en metros y λ es la longitud de onda de la señal electromagnética en metros.

Como consecuencia, este modelo lleva asociadas unas pérdidas de propagación que representan la atenuación de la señal como una magnitud resultante de la diferencia entre las potencias transmitida y recibida dependiente de la distancia Tx-Rx (d) y de la frecuencia de operación dada por la longitud de onda (λ).

$$PL(dB) = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)$$

3.1.3. Fenómenos físicos de propagación

3.1.3.1 Atenuación y absorción

En la atenuación, las pérdidas se deben a la reducción de la densidad de potencia al aumentar la distancia a la fuente, y en la absorción, a las propias características del material, que normalmente transforma la energía absorbida en calor. El comportamiento de los materiales ante estos fenómenos se determina a partir de su valor de profundidad de penetración (δ), que para el agua salada está por debajo de 1cm a frecuencias mayores de 1GHz.

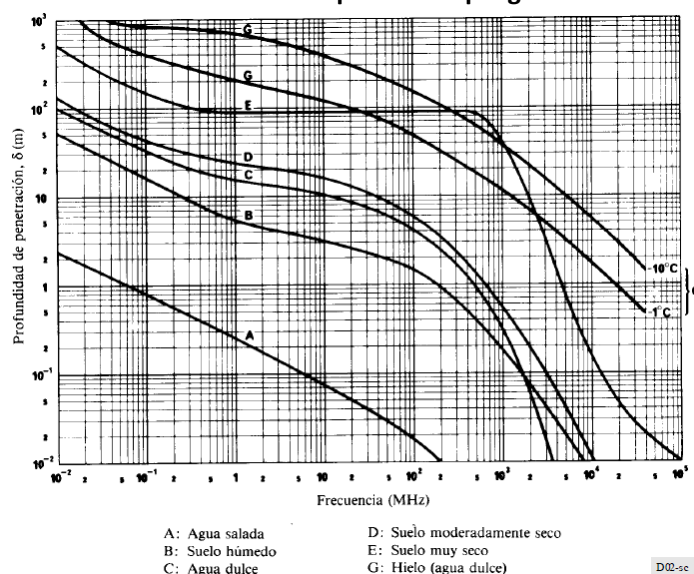


Fig. 3.2. Profundidad de penetración (δ) para distintas frecuencias y superficies [1].

El cuerpo humano se puede considerar como un conductor de conductividad media-alta, debido a su gran contenido en agua y electrolitos. Esto hace que el valor de la profundidad de penetración también sea muy pequeño para altas frecuencias.

BANDA SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN	FRECUENCIA MHz	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN cm	
		Músculos, piel y tejidos con alto contenido en agua	Grasa, huesos y tejidos con bajo contenido en agua
$f < 30$ MHz La absorción en el tronco decrece rápidamente con la frecuencia. Absorción significativa puede ocurrir en cuello y piernas.	1	91,30	-
	10	21,60	-
	27,12	14,30	150,00
$30 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$ Absorción alta debido a resonancias del cuerpo entero (70 MHz) e incluso más altas en partes del cuerpo, como la cabeza, por ej. (400 MHz)	40,68	11,20	118,0
	100	6,66	60,40
	200	4,79	39,20
	300	3,89	32,10
$400 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$ Absorción localizada por resonancias o por enfoque quasi-óptico del campo E.M. incidente	433	3,57	26,20
	750	3,18	23,00
	915	3,04	17,70
	1500	2,42	13,90
$3 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$ La energía se disipa en la superficie del cuerpo de forma similar a las radiaciones infrarrojas	2450	1,70	11,20
	3000	1,61	9,74
	5000	2,78	6,67
	5300	0,72	5,24
	8000	0,41	4,61
	10000	0,34	3,39

Fig. 3.3. Absorción del cuerpo humano.

3.1.3.2 Reflexión y refracción

Basándose en la óptica geométrica, cuando una onda se propaga en un medio de permitividad ϵ_1 , permeabilidad μ_1 y conductividad σ_1 , e incide sobre la frontera de otro

medio de parámetros $\varepsilon_2, \mu_2, \sigma_2$, del modo que se ilustra en la Fig. 3.4, una parte de la energía que transporta es reflejada y la otra transmitida al segundo medio. Asimismo, el ángulo de incidencia y el de reflexión (ϕ) son iguales, mientras que el ángulo de refracción es diferente y depende de la relación entre las permitividades relativas de los medios.

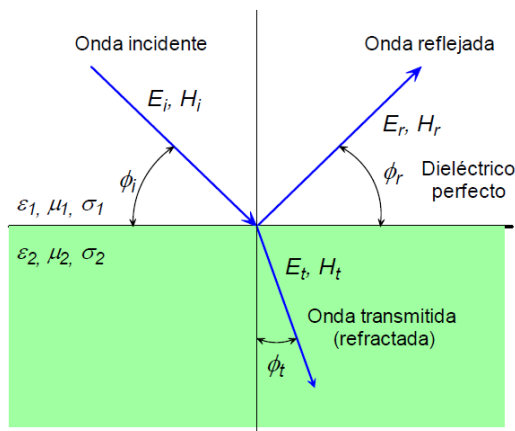


Fig. 3.4. Reflexión y refracción en la frontera entre dos medios distintos [6].

La velocidad de propagación es $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$, donde $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ y $\mu = \mu_0\mu_r$. En el espacio libre, $v = 3 \times 10^8$ m/s. Uno de los principios de la óptica geométrica establece que:

$$\frac{v_i}{\sin \phi_i} = \frac{v_r}{\sin \phi_r} = \frac{v_t}{\sin \phi_t}$$

Como la velocidad de propagación en un medio de permitividad relativa ε_r es $v = c/\sqrt{\varepsilon_r} = c/n$, donde n es el índice de refracción del medio, igual a la raíz cuadrada de ε_r :

$$\phi_i = \phi_r$$

$$n_1 \sin \phi_i = n_2 \sin \phi_t$$

Esta última relación se conoce como ley de Snell, en la que n_1 es el índice de refracción del primer medio y n_2 el del segundo.

3.1.3.3 Difracción

Ocurre cuando la trayectoria entre el transmisor y el receptor está obstruida por una superficie con irregularidades agudas o bordes que dan lugar a una flexión de las ondas alrededor del obstáculo y, aunque se mantiene la trayectoria de la señal, provoca una importante pérdida de potencia. A alta frecuencia, la difracción depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, la fase, y la polarización de la onda incidente.

El Principio de Huygens provee un modelo para comprender este comportamiento, donde cada punto de un obstáculo genera un nuevo frente de ondas, y este nuevo frente puede hasta rodear al obstáculo. Si bien el fenómeno de la difracción se da en todas las frecuencias, cuanto más baja es la frecuencia, las ondas electromagnéticas se difractan más, dando la impresión de doblar la esquina. Sin embargo, cuanto mayor sea la frecuencia de transmisión, mayores serán las pérdidas.

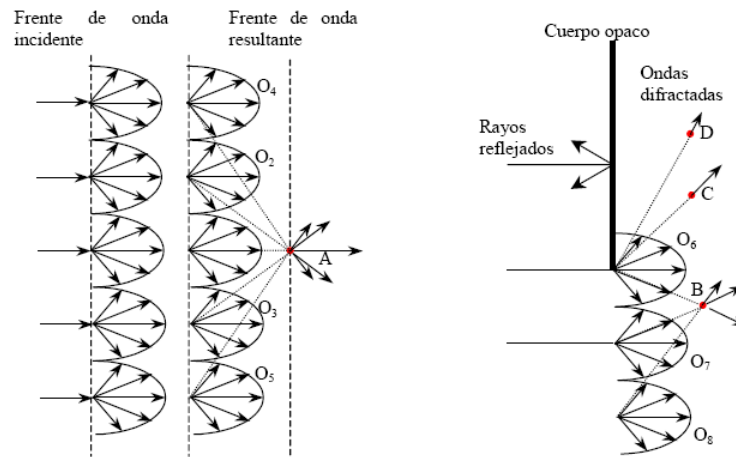


Fig. 3.5. Principio de Huygens.

En este sentido, primero es necesario definir la condición de visibilidad entre las antenas, es decir, cuándo debe considerarse que un obstáculo interrumpe el camino directo entre la antena transmisora y la receptora y, por tanto, la difracción es un mecanismo relevante en la propagación. Considérese la situación de la Fig. 3.6 en la que dos antenas isotropas están separadas una distancia R .

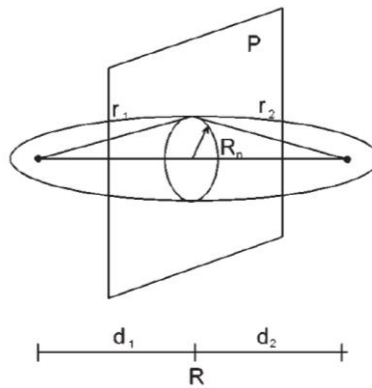


Fig. 3.6. Definición de las zonas de Fresnel [7].

A una distancia d_1 de la antena transmisora, donde se halla el obstáculo, se define un plano P infinito, perpendicular a la línea que une a la antena transmisora con la receptora. Se definen las zonas de Fresnel como aquellos puntos del espacio que cumplen:

$$(r_1 + r_2) - R = \frac{n\lambda}{2}; \quad n = 1, 2, \dots$$

Las zonas de Fresnel son elipsoides de revolución cuyo eje mayor tiene una longitud de $R + n\lambda/2$. La intersección de las zonas de Fresnel con el plano P son circunferencias cuyo radio puede calcularse para el caso que sea mucho menor que d_1 y d_2 como:

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Aplicando el principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede formarse como la superposición de fuentes elementales de ondas esféricas situadas en el plano P , radiando cada una de estas fuentes con un desfase función de la distancia r_1 . A estas fuentes equivalentes se les llama fuentes secundarias.

A partir de la definición de las zonas de Fresnel, los campos producidos por las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la zona 1 (Fig. 3.7) se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a 180° , es decir, constructivamente. Las contribuciones de las fuentes situadas en las zonas 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente, lo mismo que las de las zonas 4 y 5, 6 y 7, y así sucesivamente.

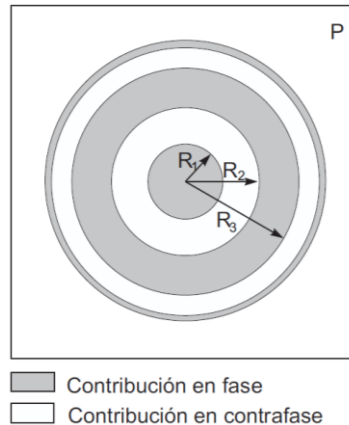


Fig. 3.7. Fase del campo producido por cada una de las fuentes secundarias sobre el receptor [7].

Por tanto, si en la situación del plano P se sitúa un plano conductor con un orificio de radio R_1 , esto es, dejando solamente las fuentes secundarias comprendidas dentro de la primera zona de Fresnel y anulando el resto, la potencia recibida en el receptor no disminuirá de forma apreciable. Es por ello que el radio de la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que mientras no exista un obstáculo dentro de la primera zona de Fresnel se considera que la trayectoria no ha sido obstruida. Por el contrario, cuando el obstáculo se encuentra dentro de la primera zona de Fresnel existirá una disminución apreciable en la potencia recibida, por lo que se considera que la trayectoria ha sido obstruida y deberá considerarse el fenómeno de la difracción. A efectos prácticos las pérdidas por difracción se suelen tener en cuenta cuando la obstrucción es superior al 40% del radio de la primera zona de Fresnel [7].

3.1.3.4 Dispersión difusa

Provoca que, cuando las ondas inciden sobre superficies rugosas, parte de la energía sea irradiada en numerosas direcciones diferentes. Si hay muchos objetos en la trayectoria de la señal, y los objetos son relativamente pequeños comparados con la longitud de onda de la señal, entonces el frente de onda propagado se distribuirá en múltiples direcciones, sumándose a las interferencias constructivas y destructivas de la señal.

El fenómeno de la reflexión especular comentado anteriormente supone que los rayos inciden sobre una superficie plana. Sin embargo, en las superficies marítimas esto raramente ocurre ya que las condiciones meteorológicas introducen un cierto grado de rugosidad que será mayor cuanto más adversas sean estas condiciones. En consecuencia, el efecto producido por este fenómeno se traduce en una reducción de la potencia del rayo especular reflejado, debido a que parte de esa potencia ha sido dispersada en múltiples direcciones, como muestra en la Fig. 3.8.

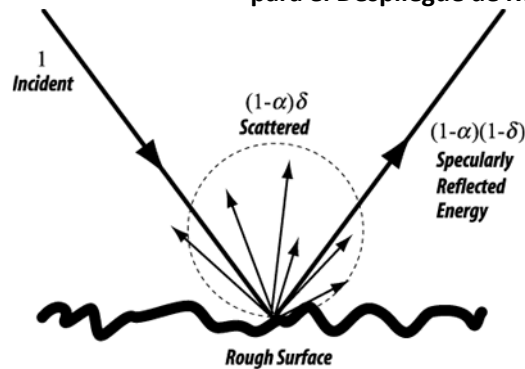


Fig. 3.8. Dispersión de una señal transmitida [8].

En definitiva, en estos casos la ley de Snell deja de funcionar y para cuantificar la influencia que puede llegar a tener una superficie rugosa en un determinado radioenlace se suele acudir a la teoría de Kirchhoff. Esta propuesta asume que todos los puntos de la superficie tienen visibilidad directa y que la distribución estadística de la altura de la superficie sigue una distribución Gaussiana, como sucede en el caso de las olas del mar. Bajo estas suposiciones, el coeficiente de reflexión efectivo, R_{rough} , se puede calcular de la siguiente manera:

$$R_{rough} = R \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i \right) \right)^2 \right]$$

donde σ_h , θ_i y R representan la desviación típica de la altura de la superficie, el ángulo de incidencia de la onda y el coeficiente de reflexión especular, respectivamente. Así pues, queda claro que el coeficiente de reflexión efectivo será menor que el especular y disminuye con el aumento de la desviación típica de la altura de las olas [8].

3.1.4. Desvanecimiento por multitrayectoria

Cuando una señal electromagnética es transmitida por el aire, es muy probable que debido a una combinación de los fenómenos físicos anteriores, alcancen el receptor múltiples réplicas de la misma. Estas réplicas, procedentes de caminos alternativos, llegarán ligeramente retardadas con respecto a la señal directa. Todas las componentes multipath modifican el nivel de potencia recibida de tal modo que, si llegan en fase con la señal directa causan interferencias constructivas y aumentan la amplitud de la señal, o si llegan en contrafase, interfieren destructivamente y pueden llegar a provocar desvanecimientos profundos.

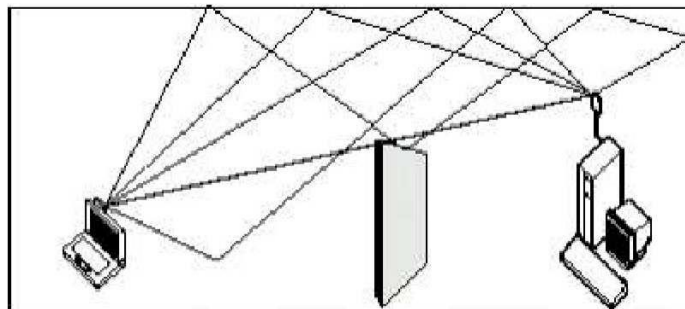


Fig. 3.9. Propagación multitrayectoria.

3.2. Redes de área personal (WPAN) y corporal (WBAN)

3.2.1. Introducción

Una red de área personal (WPAN) está pensada para interconectar dispositivos en el radio de acción de una persona, unos 10m aproximadamente. Su origen se remonta al año 1999, cuando el IEEE creó el grupo de trabajo 802.15 para el estudio de este tipo de redes y cuyos objetivos se podrían resumir de la siguiente manera:

- Que los equipos tengan un consumo de potencia mínimo para facilitar su uso con baterías.
- Que los equipos sea ligeros y manejables ya que al ser portátiles deben poder moverse con facilidad para facilitar su uso dentro de la WPAN.
- Conseguir bajos costes para asegurar su competitividad en el mercado.
- Resolver el problema de las interferencias ya que estas redes suelen trabajar en la banda ISM de 2,4 GHz, muy utilizada por este tipo de equipos al ser una banda de uso sin licencia.

Dentro del estándar 802.15 existen diferentes grupos de trabajo para satisfacer el máximo de necesidades de comunicación.

- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.1:** Este estándar, que define la capa PHY y MAC de Bluetooth, está orientado a interconectar dispositivos electrónicos permitiendo tanto la transmisión de voz como de datos.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.2:** En este grupo de trabajo se aborda la coexistencia de diferentes sistemas inalámbricos que trabajan en bandas de frecuencia que no necesitan licencia.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.3:** Este estándar fue creado por la creciente necesidad de crear WPAN de bajo consumo, que fueran capaces de transmitir la información con una mayor velocidad y eficiencia.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.4:** Sus principales características son la flexibilidad de la red, su bajo costo y el consumo de energía. Este estándar es mucho más simple y por lo tanto es más fácil de implementar.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.5:** Su objetivo era desarrollar un estándar que promoviera la creación de redes WPAN malladas y diferenciara entre mallas de baja y alta transmisión.
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.6:** También conocido como BAN (Body Area Network), es un estándar de bajo consumo desarrollado para actuar sobre, dentro o alrededor del cuerpo humano (sin limitarlo a los humanos).
- **Grupo de trabajo IEEE 802.15.7:** También conocido como VLC (Visible Light Communication), es el estándar más reciente y lo que le caracteriza es la modificación de las capas PHY y MAC para poder conseguir comunicaciones con el espectro de luz visible.

3.2.2. Redes de sensores inalámbricas (WSN)

Las redes de sensores inalámbricas (WSN - Wireless Sensor Network) están basadas en dispositivos de bajo coste y consumo (nodos) que son capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente, y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación.

Una red WSN está formada por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar parámetros como la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, el movimiento o los contaminantes. Estos dispositivos, fijos o móviles, son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un transceptor de RF y el elemento sensor.

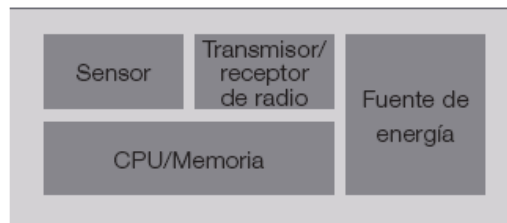


Fig. 3.10. Arquitectura de un nodo.

Debido a las limitaciones de la vida de la batería, los nodos se construyen teniendo presente la conservación de energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo de bajo consumo de potencia (sleep).

Las WSN tienen capacidad de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de autodiagnóstico, auto-configuración, auto-organización, auto-restauración y reparación, son otras de las propiedades desarrolladas para este tipo de redes. También se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), con alta probabilidad de fallo, habitualmente construidas ad-hoc para ejecutar una única aplicación muy concreta. Los principales elementos que constituyen una red WSN son los siguientes:

- **Sistema de adquisición de datos.** Los sensores son de distinta naturaleza y tecnología. Toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas. En el mercado existen placas con sensores de medida de muy diversos parámetros, como sensores de presión barométrica, GPS, luz, medida de radiación solar, humedad en suelo, humedad aire, temperatura, sonido, velocidad del viento y un largo etc.
- **Motas.** Dotan de procesamiento y de comunicación al nodo sensor. Los procesadores de radio toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos y envían la información a la estación base. Típicamente se componen de baterías, una CPU, memoria Flash, memoria para datos de programas, una placa de sensores, radio para comunicar con otras motas, un conversor analógico-digital
- **Gateway.** Permiten la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.

- **Estación base.** Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.

Por otro lado, los parámetros más importantes que caracterizan una red de sensores inalámbrica son:

- Tiempo de vida
- Cobertura de la red
- Coste y facilidad de instalación
- Tiempo de respuesta
- Precisión y frecuencia de las mediciones
- Seguridad
- Los valores principales que caracterizan al nodo sensor son los siguientes:
- Flexibilidad
- Robustez
- Seguridad
- Capacidad de comunicación
- Capacidad de computación
- Facilidad de sincronización
- Tamaño y coste
- Gasto de energía

Además, pueden ser implementadas dos arquitecturas de red distintas: centralizada en la que los nodos se comunican únicamente con el Gateway o distribuida en la que los nodos se comunican sólo con otros sensores dentro de su alcance.

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica es que un nuevo nodo, al aparecer en una red, anuncie su presencia y escuche los anuncios broadcast de sus vecinos. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y una o más formas de alcanzarlos. Los algoritmos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricas tienen que cumplir las siguientes normas:

- Mantener una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña.
- Elegir la mejor ruta para un destino dado (ya sea el más rápido, confiable, de mejor capacidad o la ruta de menor coste).
- Actualizar la tabla con regularidad.
- Requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger.

En cuanto a los sistemas operativos que emplean los microcontroladores, a continuación se enumeran los principales ejemplos de una amplia oferta disponible:

- **Bertha (pushpin computing platform).** Plataforma de software diseñada e implementada para modelar, testear y desplegar una red de sensores distribuida de muchos nodos idénticos.
- **Nut/OS.** Es un pequeño sistema operativo para aplicaciones en tiempo real, que trabaja con CPUs de 8 bits.
- **Contiki.** Es un Sistema Operativo de libre distribución para usar en un limitado tipo de computadoras, desde los 8 bits a sistemas embebidos en microcontroladores, incluidas motas de redes inalámbricas.

- **CORMOS (Communication Oriented Runtime System for Sensor Networks).** Específico para redes de sensores inalámbricas como su nombre indica.
- **eCos (embedded Configurable operating system).** Sistema operativo gratuito diseñado para aplicaciones y sistemas embebidos que sólo necesitan un proceso. Se pueden configurar muchas opciones y puede ser personalizado para cumplir cualquier requisito, ofreciendo la mejor ejecución en tiempo real y minimizando las necesidades de hardware.
- **EYESOS.** Se define como un entorno para escritorio basado en la Web, permite monitorizar y acceder a un sistema remoto mediante un sencillo buscador.
- **MagnetOS.** Sistema operativo distribuido para redes de sensores o adhoc, cuyo objetivo es ejecutar aplicaciones de red que requieran bajo consumo de energía, adaptativas y fáciles de implementar.
- **TinyOS.** Reducido núcleo multitarea, útil para pequeños dispositivos como las motas. Ha sido desarrollado para redes de sensores con recursos limitados. El entorno de desarrollo soporta directamente la programación de diferentes microprocesadores y permite programar cada tipo con un único identificador para diferenciarlo, o lo que es lo mismo se puede compilar en diferentes plataformas cambiando el atributo.
- **TKernel.** Acepta las aplicaciones como imágenes de ejecutables en instrucciones básicas. Por ello, no importará si está escrito en C++ o lenguaje ensamblador.
- **LiteOS.** Desarrollado en principio para calculadoras, pero que ha sido también utilizado para redes de sensores.
- **FreeRTOS.** Usado típicamente para aplicaciones integradas.

La programación de sensores es complicada, entre otras dificultades está la limitada capacidad de cálculo y cantidad de recursos. Podemos encontrar lenguajes como:

- **nesC.** Lenguaje utilizado para las motas, y que está directamente relacionado con TinyOS.
- **Protothreads.** Específicamente diseñado para la programación concurrente, provee hilos de dos bytes como base de su funcionamiento.
- **SNACK.** Facilita el diseño de componentes para redes de sensores, sobre todo cuando la cantidad de información o cálculos es muy voluminoso. Es un buen sustituto de nesC para crear librerías de alto nivel.
- **galsC.** Diseñado para ser usado en TinyGALS, es un lenguaje programado mediante el modelo orientado a tarea, fácil de depurar, permite concurrencia y es compatible con los módulos nesC de TinyOS.
- **SQTL (Sensor Query and Tasking Language).** Interesante herramienta para realizar consultas sobre redes de motas.

Por último, queda comentar que en estas redes la seguridad no está del todo resuelta. Un nodo sensor puede ser fácilmente accesible y los datos son enviados a través de un medio inalámbrico, por lo que es necesaria la creación de servicios de seguridad que permitan asegurar la robustez y la fiabilidad de estos sistemas, tales como primitivas de seguridad e infraestructuras de claves, sistemas de autocontrol, protocolos de funcionamiento seguro, etc.

3.2.3. Bluetooth (IEEE 802.15.1)

3.2.3.1. Definición

La tecnología Bluetooth [9] es un protocolo inalámbrico pensado para el intercambio de datos en distancias cortas entre dispositivos móviles y fijos. En sus inicios fue concebido para sustituir las conexiones cableadas RS-232. También posibilita la creación de pequeñas redes inalámbricas evitando problemas de sincronización entre dispositivos.



Fig. 3.11. Logotipo Bluetooth [9].

El Bluetooth SIG (Special Interest Group), organización privada sin ánimo de lucro y de la que forman parte empresas como Nokia, IBM, Toshiba, Intel y Ericsson, es la encargada del desarrollo de la tecnología, dejando de lado la fabricación y venta de productos.

3.2.3.2. Versiones

La primera versión de la norma (1.0a) se publicó en 1998 y posteriormente ha sido sustituida por las versiones 1.0b, 1.1 (2002), 1.2 (2005), 2.0 (2004), 2.1 (2007), 3.0 (2009), 4.0 (2010) y la más reciente 4.1 publicada en 2013. A continuación se enumeran estas versiones con las modificaciones más importantes introducidas en cada versión:

- **Versiones 1.0a y 1.0b.** Versiones iniciales con muchos problemas de interoperabilidad.
- **Versión 1.1 (2002).** Primera versión reconocida como estándar por el IEEE con el estándar IEEE 802.15.1-2002. Corregía muchos de los errores de las versiones anteriores, añadió soporte para canales no cifrados e incorporó el indicador de señal recibida (RSSI).
- **Versión 1.2 (2005).** Reconocido como el estándar IEEE 802.15.1-2005, permitía una conexión más rápida, la detección de otros dispositivos Bluetooth dentro del radio de alcance, mayor resistencia a interferencias, velocidad de transmisión real de 721Kbps, mayor calidad en los enlaces de audio, control de flujo y modos de retransmisión L2CAP.
- **Versión 2.0 + EDR (2004).** La principal diferencia con la versión anterior es la introducción del EDR (Enhanced Data Rate) que introduce una mayor velocidad de transmisión de datos entre dispositivos (hasta 2,1Mbps).
- **Versión 2.1 + EDR (2007).** Mejora el emparejamiento entre dispositivos a la vez que se incrementa la seguridad e introduce técnicas que reducen el consumo.
- **Versión 3.0 + HS (2009).** Esta versión soporta velocidades de transmisión de hasta 24Mbps en los casos en los que se utiliza HS, técnica utilizada para el

establecimiento de la conexión, realizándose la transferencia de datos mediante un enlace 802.11.

- **Versión 4.0 (2010).** Versión que incluye el Bluetooth clásico, el de alta velocidad de transmisión y protocolos de bajo consumo siendo esta última característica la principal valía de esta versión.
- **Versión 4.1 (2013).** Diseñada especialmente para el Internet de las Cosas debido a su bajo consumo, esta versión mejora las conexiones entre dispositivos y la coexistencia con otras tecnologías como LTE, además de aumentar la eficiencia en la transferencia de información.

3.2.3.3. Características técnicas

El estándar IEEE 802.15.1 [10], que define la capa física de la tecnología Bluetooth, opera en la banda sin licencia ISM entre 2,4GHz y 2,485GHz de amplio espectro y con posibilidad de transmisión full-duplex mediante saltos de frecuencia. Para ello utiliza la técnica de salto de frecuencia adaptativo AFH (Adaptative Frequency Hopping) que fue diseñada para evitar las interferencias entre dispositivos que comparten la banda de frecuencias de 2,4GHz. Esta técnica comprueba si otros dispositivos están transmitiendo en su rango y evita las frecuencias que están siendo utilizadas. Para efectuar esta comprobación realiza saltos entre 79 frecuencias a intervalos de 1MHz, hasta un máximo de 1600 por segundo, consiguiendo una transmisión más eficiente y más robusta.

El rango de alcance dependerá de la clase definida por Bluetooth a la que pertenezcan los dispositivos que se estén usando, de modo que estos pueden ser de clase 1, 2 ó 3, dependiendo de si la potencia de transmisión es de 20, 4 ó 0dBm (100, 2,5 ó 1mW) y para un alcance máximo de 100, 10 ó 1m, respectivamente.

En cuanto al consumo de energía se ha considerado una tecnología de bajo consumo. La mayoría de los dispositivos son de clase 2 y poseen modos de trabajo de bajo consumo que permiten alargar su autonomía.

Otras de las principales características técnicas de Bluetooth se presentan a continuación:

- Posibilidad de soportar transmisiones de voz y datos de manera simultánea.
- Multiplexación: FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), que disminuye el riesgo de que las comunicaciones sean interceptadas o presenten interferencia con otras aplicaciones.
- Topología: Las redes Bluetooth tienen una topología donde un dispositivo hace las veces de maestro y hasta siete dispositivos adicionales pueden operar como esclavos. Esta configuración se conoce como piconet. Un grupo de piconets es conocido como scatternet.
- La velocidad de transferencia depende de la versión que se está utilizando, la versión 1.2 permite velocidades de hasta 720kbps, la versión 2.0 hasta 2,1Mbps, la versión 2.1 hasta 3Mbps y las más recientes permite velocidades de hasta 24Mbps.

- El nivel de sensibilidad real se define como el nivel de entrada para el cual se satisface un porcentaje de error de bit (BER) del 0,1%. Para cualquier transmisor Bluetooth, la sensibilidad del receptor será de -70dBm o inferior.

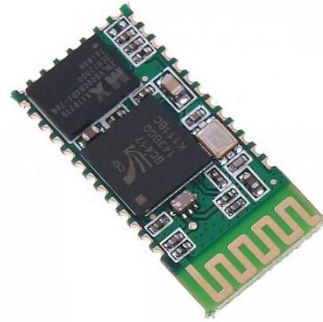


Fig. 3.12. Transceptor Bluetooth.

3.2.3.4. Protocolos Bluetooth

Uno de los principales objetivos de la tecnología Bluetooth desde su nacimiento ha sido la total compatibilidad entre los dispositivos que usen esta tecnología independientemente del fabricante. Para ello todos los equipos deberán estar implementados sobre la misma estructura de protocolos. En la Fig. 3.13 se muestra la pila de protocolos completa.

Esta arquitectura fue diseñada con el propósito de maximizar el número de aplicaciones que puedan implementarse bajo el protocolo Bluetooth. Para conseguir este propósito se reutilizaron protocolos existentes para las capas superiores dejando los específicos de Bluetooth para las capas inferiores.

Típicamente las aplicaciones no utilizan todas las capas disponibles. No obstante, la especificación permite a los fabricantes desarrollar sus propias capas de aplicación para aumentar las capacidades de sus aplicaciones creadas sobre la tecnología Bluetooth.

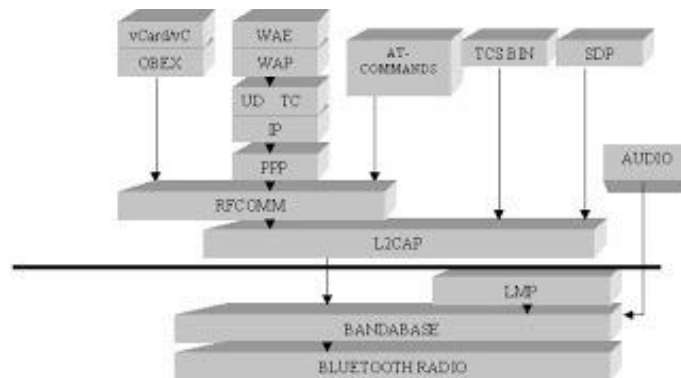


Fig. 3.13. Protocolos Bluetooth [9].

Los protocolos mostrados en la figura anterior pueden ser clasificados según su propósito en los siguientes cuatro grupos:

- Protocolos centrales de Bluetooth: Banda base, LMP, L2CAP y SDP.
- Protocolos de sustitución de cable: RFCOMM.
- Protocolos de control de telefonía: TCS BIN y AT-Commands.

- Protocolos adaptados: PPP, UDP y TCP/IP, OBEX, WAP, vCard, VCal y WAE.

Los protocolos centrales son los desarrollados completamente por el Bluetooth SIG en la gran mayoría de los dispositivos y son los encargados de, según el modelo OSI, los niveles físico, de enlace y de red. Los protocolos de sustitución de cable, control de telefonía y adaptados son los orientados a la aplicación y se encargan de asegurar que las aplicaciones funcionen sobre los protocolos centrales.

La banda base se podría incluir en la capa física del modelo OSI. Su principal función es controlar los canales y enlaces físicos. Además de su función principal también se encarga de las funciones de sincronización, codificación, decodificación, control de errores y seguridad al más bajo nivel. Soporta enlaces simétricos punto a punto (SCO) y enlaces punto a multipunto ACL. La capa de radio es la inferior del estándar, la más cercana a la capa física del modelo OSI, y se encarga de la transmisión de los datos.

3.2.3.5. Perfiles Bluetooth

El estándar Bluetooth fue diseñado para ser utilizado por un gran número de fabricantes en distintos campos. Para evitar distintas interpretaciones del estándar el Bluetooth SIG creó un conjunto de perfiles. Un perfil define una selección de mensajes y protocolos necesarios para la implementación de una determinada aplicación. Cada perfil contiene información de los siguientes conceptos:

- Sugerencias a cerca del formato de las interfaces de usuario.
- Partes específicas del protocolo de pila usado por el perfil. Para llevar a cabo esta tarea cada perfil utiliza opciones particulares y parámetros en cada capa de la pila.
- Dependencias con otros perfiles.

La tecnología Bluetooth describe un amplio conjunto de perfiles que muestran los diferentes tipos de escenarios en los que pueden ser utilizados (Fig. 3.14).

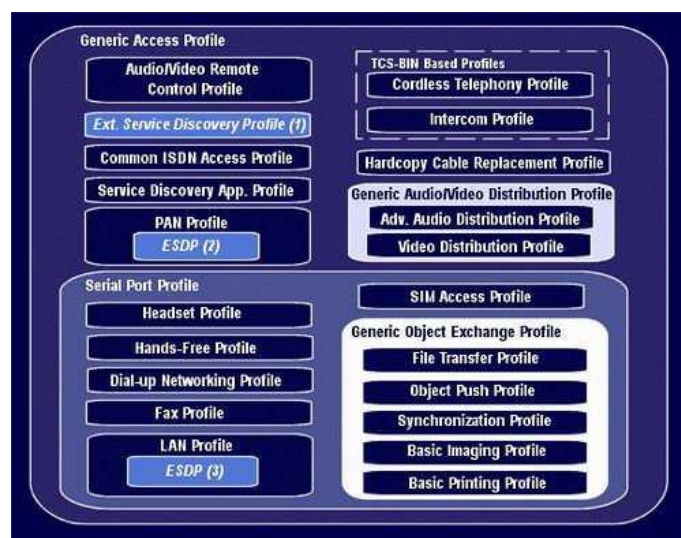


Fig. 3.14. Perfiles Bluetooth [9].

3.2.3.6. Topologías de red

Bluetooth proporciona dos tipos de conexiones, punto a punto y punto a multipunto. En el segundo caso dos o más dispositivos comparten el canal. Cuando ocurre esto se define el tipo de red como piconet. En esta topología de red uno de los dispositivos actúa como maestro y los demás como esclavos. El estándar permite a todos los dispositivos asumir cualquiera de los dos roles permitiendo incluso que un dispositivo sea maestro en una red y esclavo en otra.

El número máximo de dispositivos en una piconet es 8. Teniendo en cuenta que uno de ellos es el maestro, podrá haber hasta 7 esclavos activos. La puntualización de hasta 7 esclavos activos quiere decir que pueden haber muchos más dispositivos en la red pero no podrá haber nunca más de siete transmitiendo. El maestro se encarga de decidir cuáles de los disponibles pueden acceder al canal. Un conjunto de varias redes piconet forman la topología denominada scartternet.

Como ya se ha dicho, cada red piconet puede tener un único dispositivo maestro pero los dispositivos esclavo pueden participar en más de una piconet utilizando técnicas de multiplexación en el tiempo.

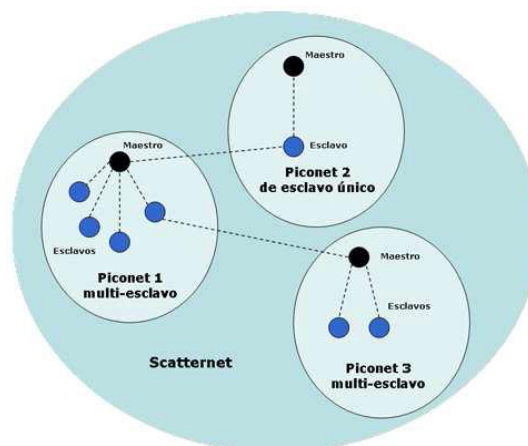


Fig. 3.15. Topologías de red Bluetooth [9].

3.2.4. ZigBee (IEEE 802.15.4)

3.2.4.1. ZigBee Alliance

ZigBee Alliance es una asociación formada en 2002, sin ánimo de lucro, de más de 175 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objetivo de auspiciar el desarrollo e implantación de una tecnología inalámbrica de bajo coste, así como de promocionar eventos entre fabricantes, como los llamados “BeeFests”, dedicados a intentar mejorar la interoperabilidad entre marcas.



Fig. 3.16. Logotipo ZigBee Alliance [11].

Destacan empresas como Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Ember, Philips y Motorola que trabajan para convertir ZigBee en un estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para aplicaciones de domótica, automatización de edificios, control industrial, periféricos de PC, juguetería, sensores médicos, etc. Los miembros de esta alianza justifican, como se comentaba antes, el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo de Bluetooth.

ZigBee describe un protocolo normalizado para Redes Inalámbricas de Área Personal o WPAN. Es diferente de los otros estándares inalámbricos porque ha sido diseñado para soportar un mercado de diversas aplicaciones que requieren bajo coste y consumo, con una conectividad más sofisticada que otros sistemas. El estándar ZigBee enfoca a un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja transmisión de datos y bajo ciclo de servicio de conectividad.

Está basado en el estándar IEEE 802.15.4, que define la capa física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC). La alianza ZigBee ha añadido las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee.

3.2.4.2. Arquitectura

ZigBee está basado en el modelo OSI de siete capas de red. Las capas física y de acceso al medio están definidas en el estándar 802.15.4, definiendo la especificación ZigBee, las capas de red y aplicación y los mecanismos de seguridad. La capa de aplicación está formada por la subcapa APS de soporte de aplicación, el ZigBee Device Object (ZDO) y los objetos de aplicación definidos por cada fabricante.

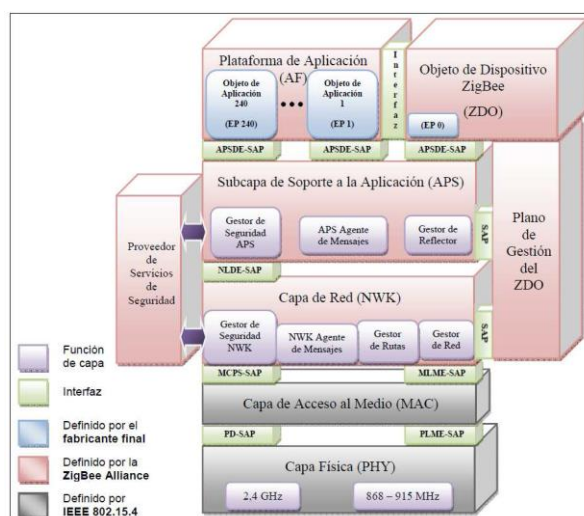


Fig. 3.17. Arquitectura de la especificación ZigBee [11].

3.2.4.3. Capa física (PHY)

El IEEE 802.15.4 [12] ofrece dos opciones de PHY que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en red. Ambas PHYs se basan en métodos de secuencia directa de espectro ensanchado (DSSS) que resultan en bajos costes de implementación, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes low-duty-cycle (bajo ciclo de ocupación) con operaciones de bajo consumo de energía. Las principales características que diferencian ambas PHYs se pueden ver en la Tabla 3.1.

Capa física	Banda	Parámetros de los Datos			Parámetros de chip	
		Velocidad bits (kbps)	Velocidad símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad chip (kchip/s)	Modulación
868/915 MHz	868 – 868.6 MHz	20	20	BPSK	300	BPSK
	902 – 928 MHz	40	40	BPSK	600	BPSK
2.4GHz	2.4 – 2.4835 GHz	250	62.5	16-ary ortogonal	2000	O-QPSK

Tabla 3.1. Parámetros de modulación [12].

Canalización

La PHY de los 868/915MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, al estar las dos bandas lo suficientemente cercanas, se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costes de fabricación. La PHY de los 2.4GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835GHz con un amplio espacio entre canales (5MHz), para facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

Dado que existe una tendencia a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como las interferencias no intencionadas de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos, la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda de señales a través de una lista de canales permitidos, mientras que la PHY contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

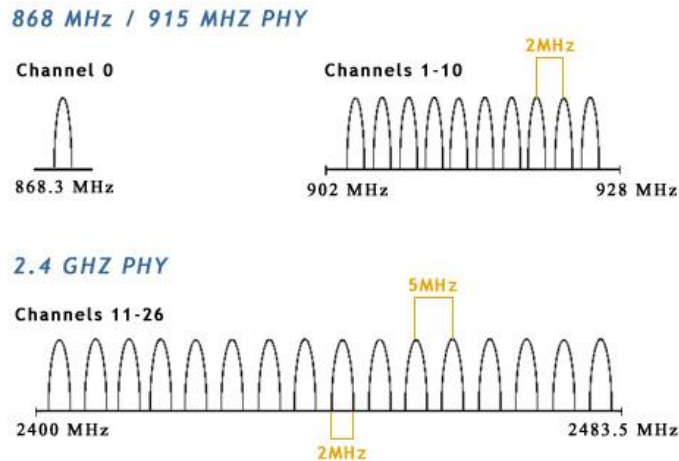


Fig. 3.18. Estructura de canales [12].

Modulación

La PHY en los 868/915MHz utiliza una aproximación simple DSSS en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip que resulta es modulada dentro de la portadora utilizando BPSK (Binary Phase Shift Keying). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

La PHY de los 2.4GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos de DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios son agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semiortogonales de código de pseudo-ruído (PN). Las secuencias de PN son concatenadas para que sean datos de símbolos correctos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (Minimum Shift Keying). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un SNR ligeramente menor (< 0.5dB).

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su SNR en 2dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la PHY 868/915 tiene una ventaja de 6-8dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector, y demás resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

Sensibilidad y rango de alcance

Las especificaciones actuales de sensibilidad del IEEE 802.15.4 especifican -85dBm para la PHY de los 2.4GHz y de -92dBm para la PHY de los 868-915MHz. Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias requeridas debido a las imperfecciones de fabricación. En cualquier caso, los mejores dispositivos deben de ser del orden de 10dB mejores que las especificaciones.

Naturalmente el rango de alcance deseado variará en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos 1mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor.

Los dispositivos ZigBee se espera que cubran un rango de 10-100m, aunque esto depende del entorno, de la potencia de transmisión concreta y de la sensibilidad del receptor exacta. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo mesh ofrecen una alternativa atractiva con coberturas caseras dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

3.2.4.4. Capa de control de acceso al medio (MAC)

La capa MAC, es la responsable de asegurar la comunicación entre un nodo y todos los nodos conectados directamente a él, evitando colisiones y mejorando la eficiencia. Más concretamente, las tareas que la capa MAC tiene que realizar son:

- Generar balizas (beacons) si el dispositivo es un coordinador y funciona en modo balizado.
- Sincronizar las balizas de la red.
- Gestionar la conexión y desconexión a la red de los dispositivos asociados al propio nodo.
- Emplear el algoritmo CSMA-CA para gestionar el acceso al canal.
- Asegurar un enlace fiable con la capa MAC de los nodos contiguos.

El protocolo MAC soporta dos modos de funcionamiento (el coordinador es el encargado de seleccionar uno u otro en el momento de iniciar la red):

- **Modo balizado.** La baliza es generada periódicamente por el coordinador y distribuida por toda la red gracias a los routers. Dicha baliza sirve para sincronizar todos los nodos de la red, de modo que estos puedan despertarse en un momento determinado (conocido por todos), enviar los datos almacenados y volver al modo de ahorro energético (sleep). Así, tanto el coordinador, como los routers y los dispositivos finales pueden pasar gran parte del tiempo en modo de bajo consumo. La topología en malla no admite el modo balizado debido a la complejidad que ello conllevaría (a un mismo dispositivo podrían llegarle balizas provenientes de distintos routers).
- **Modo no balizado.** En este modo los dispositivos no están sincronizados unos con otros. Así, únicamente los dispositivos finales pueden entrar en el modo sleep mientras que los routers y el coordinador deben estar continuamente con el sistema radio en modo recepción y así estar preparados para recibir datos en cualquier momento. Este modo es más simple pero hace que gran parte de sus nodos (el coordinador y los routers) tengan un mayor consumo energético. Asimismo, impide que los coordinadores puedan planificar sus envíos a los dispositivos finales.

3.2.4.5. Capa de red (NWK)

La capa de red se define en la especificación de ZigBee. Esta capa es necesaria para gestionar las capas físicas y MAC del estándar 802.15.4, y para proveer de una adecuada interfaz de servicio al nivel de aplicación. Básicamente las tareas que realiza la capa de red son las siguientes:

- Configuración de nuevos dispositivos.
- Inicialización de la red PAN.
- Asociación, reasociación y abandono de una red.
- Adjudicación de direcciones de red.
- Descubrimiento de la topología de red.
- Encaminamiento (routing).

A nivel de red, existen dos tipos de direcciones, direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. Así pues, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta.

El estándar IEEE 802.15.4 dispone de dos tipos distintos de dispositivos:

- **FFD (Full Function Device):** dispositivo de función completa que se puede usar en cualquier topología. Puede operar como Coordinador PAN o como dispositivo de red (end point).
- **RFD (Reduced Function Device):** dispositivo de función reducida. Limitado a una topología en estrella. No puede ser Coordinador de red, solo puede recibir órdenes o informar a un Coordinador cercano, y es muy fácil de implementar.

También se definen los roles que pueden adquirir los dispositivos en la red:

- **Coordinador:** es el dispositivo encargado de inicializar y gestionar la red, así como las tareas de seguridad. En toda red ZigBee ha de existir un coordinador.
- **Router:** estos dispositivos gestionan el tráfico y dan la posibilidad de aumentar el tamaño y número de dispositivos en una red. Pueden estar conectados al coordinador o a otro router.
- **Dispositivo Final:** este tipo de dispositivos normalmente serán los que envíen y reciban información pero no realizan tareas de encaminamiento. Deben estar conectados a un router o directamente al coordinador y no admiten dispositivos conectados a ellos. Están la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo saliendo de él únicamente cuando tienen que transmitir información.

Topologías de red

La especificación determina tres posibles topologías de red: en estrella, mallada o en árbol. Estas están representadas en la Fig. 3.19.

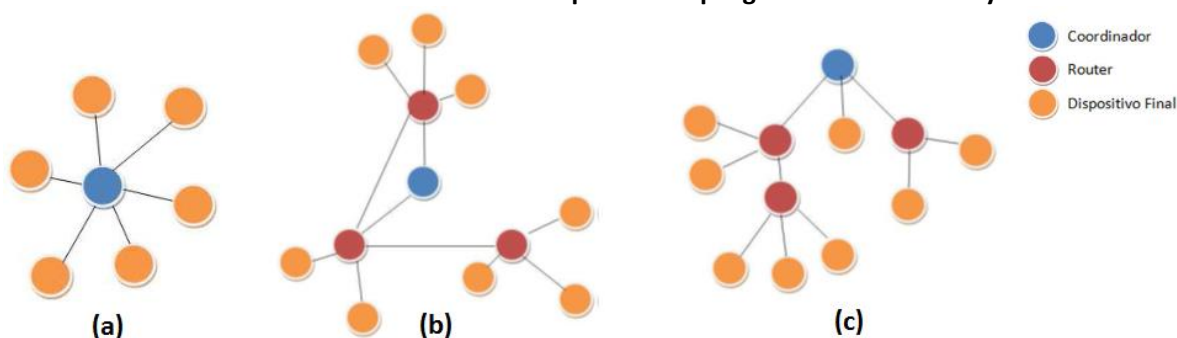


Fig. 3.19. Topología de red en estrella (a), en malla (b) y en árbol (c).

Los inconvenientes de la topología en estrella son que la expansión de la red se ve limitada por el radio de alcance del dispositivo coordinador y que el consumo de este puede llegar a ser elevado, por lo que se recomienda alimentarlo mediante la red eléctrica. Por otra parte, en la topología mallada, el hecho de repartir las tareas de coordinación y encaminamiento en más de un dispositivo aumenta la fiabilidad y la flexibilidad, a costa de una mayor complejidad. La topología en árbol tiene la ventaja de que facilita la expansión de una red al poder añadir nodos con facilidad. Al igual que en el caso anterior se recomienda que el coordinador y los routers estén alimentados con baterías.

3.2.4.6. Capa de aplicación (APL)

La capa de aplicación ZigBee está compuesta por la subcapa de soporte de aplicación (APS), el marco de aplicación (application framework) y el objeto de dispositivo ZigBee (ZigBee Device Object o ZDO). En la Fig. 3.20 podemos ver una representación de la capa de aplicación y sus diferentes partes.

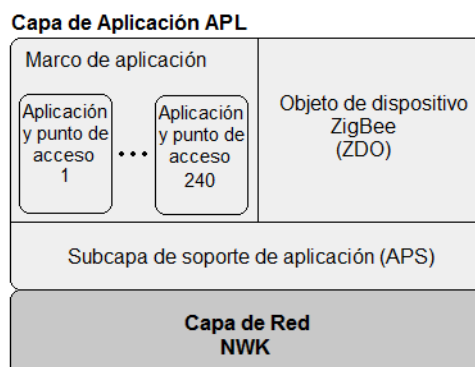


Fig. 3.20. Capa de aplicación [11].

Subcapa de soporte de aplicación (APS o Application Sublayer)

La subcapa de soporte de aplicación proporciona una interfaz de comunicación entre la capa de red y la capa de aplicación. Las tareas que realiza esta capa son:

- Genera la PDU a nivel de aplicación.
- Una vez los puntos de acceso de dos dispositivos están vinculados, la capa APS es la encargada de gestionar el intercambio de mensajes.

- Mejorar la fiabilidad de la capa de red. Por ejemplo, se puede definir una confirmación ack a nivel de aplicación.
- Rechaza mensajes recibidos por duplicado.

Marco de aplicación (AF o Application Framework)

El marco de aplicación es el entorno en el cual se gestionan las diferentes aplicaciones. Cada una de dichas aplicaciones está relacionada a un punto de acceso distinto.

Se permiten hasta 240 aplicaciones distintas dentro de un mismo dispositivo. El punto de acceso 0 está asignado al nivel ZDO. El rango de 241-254 está reservado para uso futuro. Por último, el punto de acceso 255 es usado para la comunicación broadcast con todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación.

Esta capa es la encargada de definir tanto el perfil de aplicación como los diferentes clusters. Cada cluster se caracteriza por un identificador propio (cluster ID).

Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO o ZigBee Device Object)

Este nivel satisface necesidades comunes a todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación. Las tareas que realiza son:

- Inicializar las capas APS y de red.
- Definir el rol del dispositivo dentro de la red (coordinador, router o dispositivo final).
- Gestiona los vínculos entre puntos de acceso.
- Asegura una comunicación segura entre dispositivos.

3.2.4.7. Implementaciones comerciales

Algunos de los principales fabricantes de dispositivos electrónicos basados en ZigBee son:

Digi International

XBee es una gama de módulos de radio que dispone de una amplia variedad de modelos, componentes, firmware, potencias de transmisión y antenas. Trabajan con un voltaje de operación de 3,3 voltios y, aunque incorporan hasta 20 pines para distintas operaciones como reinicio o modo de bajo consumo, pueden funcionar haciendo uso tan sólo de sus 4 pines principales: alimentación, tierra, y entrada y salida de datos.

Cuentan con un microchip que les permite realizar operaciones con un nivel de lógica muy básico, como leer directamente datos de sensores y retransmitirlos sin tener que contar con procesamiento externo. Para lógica más avanzada deben conectarse a otro dispositivo que se encargue de ello, como un microcontrolador más complejo. Algunos de los tipos de módulos XBee son:

- **Serie 1.** Esta serie de módulos XBee proporciona soporte para comunicaciones punto a punto de forma simple y basándose en el estándar 802.15.4. Su principal ventaja es la sencillez.

- **Serie 2.** Estos módulos permiten implementar redes malladas siguiendo el protocolo ZigBee. Además poseen un mayor alcance y un menor consumo que la serie 1.



Fig. 3.21. Módulo XBee de la Serie 2 [13].

Atmel

Esta empresa ofrece dispositivos basados en la combinación de su serie de microcontroladores conocida como AVR y un sistema radio especialmente diseñado para 802.15.4. Atmel ofrece dos gamas de dispositivos:

- **Series AT86RF230 y AT86RF231.** Ambas trabajan a 2,4GHz.
- **Serie AT86RF212.** Esta serie trabaja en las frecuencias de 868 y 915MHz y cumple con el estándar 802.15.4c. Dicho estándar es una variante del 802.15.4 que especifica el uso de la banda ISM en China. Con la comercialización de esta serie Atmel pretende expandir su cuota de mercado en dicho país.

Ember

Ember se centra casi exclusivamente en la fabricación de dispositivos relacionados con ZigBee. Los productos básicos que ofrece son:

- **EM250 SoC.** Sistema que engloba tanto el microprocesador como el transceptor y trabaja a 2,4GHz.
- **EM260 Co-Processor.** Este chip combina un transceptor, que también trabaja a 2,4GHz, con un microprocesador de capacidad limitada. Tiene una conexión SPI/UART (Serial Peripheral Interface/Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) para poder conectar cualquier microprocesador a dicho sistema. De esta forma se permite al diseñador implementar de forma independiente la parte más alta de la capa de aplicación (marco de aplicación).

Freescall

La versión ZigBee de Freescall es conocida como BeeStack. Respecto a la capa MAC, Freescall ofrece la posibilidad de usar el protocolo SMAC (simple MAC), una versión propia y simplificada de la capa MAC 802.15.4. Freescall ofrece las siguientes gamas de productos:

- **MC1320X RF Transceiver.** Transceptor basado en 802.15.4. Posee una conexión SPI para poder conectarlo a cualquier microprocesador.
- **MC1321X System in Package.** Combina un transceptor MC13202 con un microprocesador de freescall (MC9S08GT).
- **MC13224 Platform in Package.** Combinación de transceptor 802.15.4 y microcontrolador centrada en la optimización energética del transceptor.

Jennic

Jennic oferta los siguientes chips. Los tres están compuestos por un transceptor y un microprocesador. JN5148 es el producto más reciente y el que ofrece unas mejores características. Jennic tiene una versión propia de la capa de red conocida como JenNet.

- **JN5148.**
- **JN5139.**
- **JN5121.**

Texas Instruments

Texas Instruments, que también brinda la oportunidad de trabajar con una capa MAC (TIMAC), ofrece varias gamas de productos ZigBee, todas ellas trabajando a 2,4GHz:

- **CC2430 y CC2431.** Combinación de transceptor y microcontrolador en un único chip. Trabaja usando Z-Stack, la versión de ZigBee de TI. Los Kits de desarrollo asociados son CC2430DK y CC2431DK.
- **CC2480.** Coprocesador ZigBee con conexión SPI/UART. Está pensado para trabajar conectado a un microprocesador. El coprocesador ZigBee maneja el sistema radio y en él se integran las capas física, MAC, de red y parte de la de aplicación. El Kit de desarrollo asociado es eZ430-RF2480.
- **CC2420 y CC2520.** Transceptor 802.15.4 pensado para trabajar conectado a un microprocesador MSP430 de TI. El Kit de desarrollo asociado es CC2520DK.

3.2.5. Identificación por Radiofrecuencia (RFID)

3.2.5.1. Descripción de la tecnología

RFID (Identificación por Radiofrecuencia) [14] es un método de almacenamiento y recuperación remota de datos, basado en el empleo de etiquetas en las que reside la información, y que utiliza señales de radiofrecuencia en diferentes bandas dependiendo del tipo de sistema. Atendiendo a diversos criterios, existen distintos tipos de sistemas RFID, los cuales pueden satisfacer un amplio abanico de aplicaciones para los que pueden ser utilizados. Sin embargo, a pesar de que los aspectos tecnológicos pueden variar, todos se basan en el mismo principio de funcionamiento, que se describe a continuación:

1. Se equipa a todos los objetos a identificar, controlar o seguir, con una etiqueta RFID.
2. La antena del lector o interrogador emite un campo de radiofrecuencia que activa las etiquetas.
3. Cuando una etiqueta ingresa en dicho campo utiliza la energía y la referencia temporal recibidas para realizar la transmisión de los datos almacenados en su memoria. En el caso de etiquetas activas la energía necesaria para la transmisión proviene de la batería de la propia etiqueta.
4. El lector recibe los datos y los envía al ordenador de control para su procesamiento.

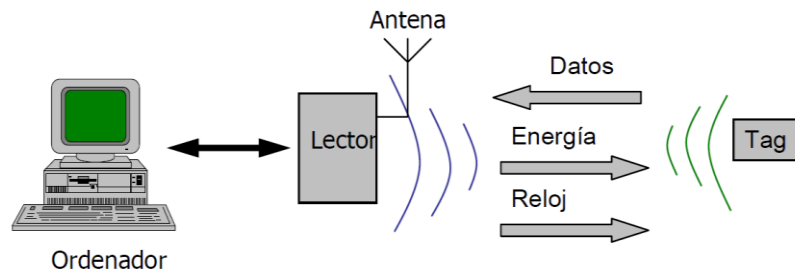


Fig. 3.22. Esquema de funcionamiento de un sistema RFID pasivo [15].

Como podemos ver en la Fig. 3.22, existen dos interfaces de comunicación:

- **Interfaz Lector-Sistema de Información.** La conexión se realiza a través de un enlace de comunicaciones estándar, que puede ser local o remoto y cableado o inalámbrico como el RS 232, RS 485, USB, Ethernet, WLAN, GPRS, UMTS, etc.
- **Interfaz Lector-Etiqueta.** Se trata de un enlace radio con sus propias características de frecuencia y protocolos de comunicación.

3.2.5.2. Componentes del sistema

Transpondedores

El transpondedor es el dispositivo que va embebido en una etiqueta o tag y contiene la información asociada al objeto al que acompaña, transmitiéndola cuando el lector la solicita. Está compuesto principalmente por un microchip y una antena. Adicionalmente puede incorporar una batería para alimentar sus transmisiones o incluso, algunas etiquetas más sofisticadas, pueden incluir una circuitería extra con funciones adicionales de entrada/salida, tales como registros de tiempo u otros estados físicos que pueden ser monitorizados mediante sensores apropiados (de temperatura, humedad, etc.).

La información de la etiqueta se transmite modulada en amplitud (ASK, Amplitude Shift Keying), frecuencia (FSK, Frequency Shift Keying) o fase (PSK, Phase Shift Keying), siendo ASK la modulación más utilizada debido a su mayor sencillez a la hora de realizar la demodulación.

La frecuencia utilizada por el transpondedor, en la gran mayoría de los casos, coincide con la emitida por el lector. Sin embargo, en ocasiones se trata de una frecuencia subarmónica (submúltiplo de la del lector) o incluso de una frecuencia totalmente diferente de la del lector (no armónica).

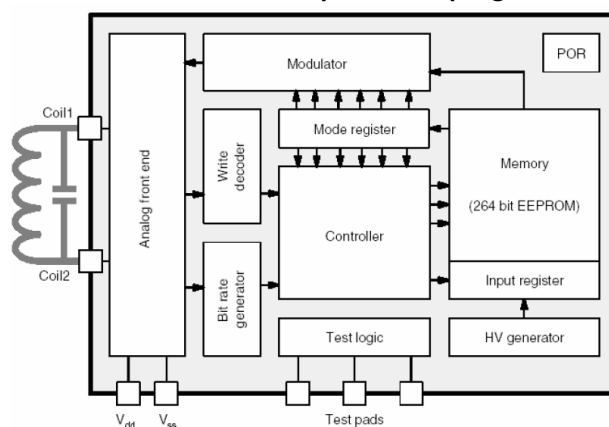


Fig. 3.23. Esquema de un transpondedor de RFID [15].

Existen dos mecanismos por los cuales es posible transferir la potencia de la antena del lector a la antena de la etiqueta, para que ésta transmita su información: acoplamiento inductivo y propagación por ondas electromagnéticas. En la Tabla 3.2 se puede ver, a grandes rasgos, una comparación entre ambos modos.

Propagación por acoplamiento inductivo	Propagación por ondas electromagnéticas
Trabaja en el campo cercano (cobertura baja)	Trabaja en el campo lejano (mayor cobertura)
Hay que considerar la orientación de la antena	La orientación de la antena es indiferente
Suele trabajar a bajas frecuencias	Suele trabajar a altas frecuencias
Suele utilizar etiquetas pasivas	Suele utilizar etiquetas activas
Es muy sensible a las interferencias electromagnéticas	Necesita regulación

Tabla 3.2. Modos de funcionamiento y principales características.

Los parámetros que caracterizan las etiquetas RFID y comprenden las bases para diseñar sus especificaciones son: el modo de alimentación, la capacidad y tipo de datos almacenados, la velocidad de lectura de datos, las opciones de programación, la forma física y los costes.

Modo de alimentación

Aunque los niveles requeridos para que el transpondedor envíe la información son muy pequeños, del orden de micro a miliwatios, es necesario que las etiquetas dispongan de algún tipo de alimentación. Dependiendo del modo en que éstas obtengan su potencia, las etiquetas se clasifican en activas o pasivas.

Las **etiquetas activas**, además de recoger energía del lector, se alimentan de una batería. Normalmente incorporan una pila que posee una alta relación potencia-peso y son capaces de funcionar en un intervalo de temperaturas que va desde -50°C hasta 70°C.

Aunque el empleo de baterías implica un tiempo de vida finito para el dispositivo, la colocación de una pila acoplada de forma apropiada a la circuitería de baja potencia, puede asegurar un tiempo de vida de algo más de 10 años, dependiendo también de las

condiciones de trabajo en las que se encuentre, es decir, las temperaturas, ciclos de lectura/escritura y su utilización.

Típicamente son dispositivos de lectura/escritura. Además, una ventaja adicional que presentan frente a las etiquetas pasivas es que pueden usarse para gestionar otros dispositivos, como pueden ser los sensores.

En términos generales las etiquetas RFID activas permiten un radio de cobertura mayor, mejor inmunidad al ruido y tasas de transmisión más altas cuando se trabaja a alta frecuencia. Estas ventajas se traducen en un coste mayor, por lo que se aplican cuando los bienes a identificar lo justifican.

Las **etiquetas pasivas** funcionan sin una batería interna, obteniendo la potencia que necesitan para funcionar del campo generado por el interrogador.

La ausencia de batería provoca que los transpondedores pasivos sean mucho más ligeros, pequeños, flexibles y baratos que los activos, hecho que redundará en que puedan ser diseñados en una amplia gama de formas. Además, ofrecen un tiempo de vida prácticamente ilimitado. Como contrapartida, poseen unos radios de cobertura menores y requieren más cantidad de energía procedente del interrogador para poder transmitir los datos. También poseen restricciones a la hora de almacenar los datos y no funcionan demasiado bien en ambientes con interferencias electromagnéticas. Asimismo, su sensibilidad y orientación están limitadas por la potencia disponible.

Tipo de datos y capacidad de almacenamiento

Con el fin de satisfacer las necesidades de recuperación de los datos almacenados en las etiquetas, se requiere de algún tipo de organización como identificadores para los datos o bits de detección de errores (bits de paridad, bits de redundancia cíclica). Este proceso se suele conocer como codificación de fuente.

La cantidad de datos que se desea almacenar, evidentemente dependerá del tipo de aplicación que se desee desarrollar. Básicamente, las etiquetas pueden usarse con el fin de transportar:

- Un **identificador**. El tag almacena una cadena numérica o alfanumérica que puede representar:
 - Una identidad. Tanto para identificar un artículo de fabricación o un producto en tránsito, como para proporcionar una identidad a un objeto, animal o individuo.
 - Una clave de acceso a otra información que se encuentra almacenada en un ordenador o sistema de información.
- **Ficheros de datos**. Se denominan PDF (Portable Data Files) y permiten el almacenamiento de información organizada, sin perjuicio de que adicionalmente exista un enlace a información adicional contenida en otro sitio. El objeto del PDF puede ser:
 - Transmitir la información.
 - Iniciar acciones.

En términos de capacidades de datos son habituales los tags que permiten almacenar desde un único bit hasta centenares de kilobits, incluso ya existen etiquetas en

el orden del Mbit. Considerando que 8bits representan un carácter, una capacidad de 1kbit permite almacenar 128 caracteres.

Frecuencia y velocidad de transmisión

Las etiquetas también las podemos clasificar según el rango de frecuencias en el que opera, es decir, en que frecuencias se comunicará con el lector:

- **Baja Frecuencia (LF):** se refiere a rangos de frecuencia inferiores a 135KHz.
- **Alta Frecuencia (HF):** cuando la frecuencia de funcionamiento es de 13.56MHz.
- **Ultra Alta Frecuencia (UHF):** comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 433MHz, 860MHz, 928MHz.
- **Frecuencia de Microondas:** comprende las frecuencias de funcionamiento en las bandas de 2.45GHz y 5.8GHz.

Una mayor frecuencia suele significar una mayor velocidad en la transmisión de datos, aunque también encarece el precio del sistema. Elegir el rango de frecuencia es uno de los parámetros de diseño más importante a la hora de crear un sistema RFID, y se deberá adecuar a la aplicación diseñada.

Otro aspecto a considerar es la velocidad con que las etiquetas se mueven dentro de la zona de lectura. El tiempo que tarda una etiqueta en atravesar una zona de lectura debe ser superior al tiempo de lectura de la propia etiqueta, o no dará tiempo al lector para que pueda realizar adecuadamente la lectura.

Opciones de programación

Dependiendo del tipo de memoria que incorpore el transpondedor, los datos transportados pueden ser:

- **De sólo lectura.** Son dispositivos de baja capacidad, programados por el fabricante desde el primer momento. Normalmente portan un número de identificación o una clave a una base de datos donde existe información dinámica relativa al objeto, animal o persona a la que van adheridos.
- **De una escritura y múltiples lecturas.** Son dispositivos programables por el usuario, pero una única vez.
- **De lectura y escritura.** También son programables por el usuario pero adicionalmente permiten modificar los datos almacenados en la etiqueta. Los programadores permiten la escritura directamente sobre la etiqueta adherida al objeto en cuestión, siempre y cuando se encuentre dentro del área de cobertura del programador.

EPCGlobal [16] es la organización de empresas que está específicamente orientada a desarrollar estándares globales para un Código Electrónico de Producto (EPC, Electronic Product Code) y que tiene el objetivo de normalizar la información contenida en las etiquetas RFID. En la Tabla 3.3 se resumen los diferentes protocolos especificados junto con el tipo de etiquetas y rango de frecuencias que lleva asociadas.

Protocolo	Frecuencia	Tipo de etiqueta
Clase 0	UHF	Solo lectura
Clase 0 Plus	UHF	Lectura-Escritura
Clase 1	HF/UHF	Una escritura-Múltiples lecturas
Clase 1 Gen2	UHF	Una escritura-Múltiples lecturas
Clase 2	UHF	Lectura-Escritura

Tabla 3.3. Protocolos definidos por la organización EPCGlobal [16].

Forma y dimensiones

Las etiquetas RFID pueden tener muy diversas formas, tamaños y carcasas protectoras, dependiendo de la utilidad para la que son creados. El proceso básico de ensamblado consiste en la colocación, sobre un material que actúa como base (papel, PVC), de una antena hecha con materiales conductivos como la plata, el aluminio o el cobre. Posteriormente se conecta el microchip a la antena y opcionalmente se protege el conjunto con un material que le permita resistir condiciones físicas adversas. Este material puede ser PVC, resina o papel adhesivo. Una vez construida la etiqueta, su encapsulación puede variar de modo que faciliten su inserción o acoplamiento a cualquier material (madera, plástico, piel...).



Fig. 3.24. Ejemplos de etiquetas RFID comerciales.

Coste

El mínimo precio objetivo actualmente es de unos 5 céntimos de euro por etiqueta, aunque los principales factores del tipo de etiqueta que influyen en el coste de esta son:

- La complejidad de la lógica del circuito, de la construcción de la etiqueta o de su capacidad de memoria, influirá en el coste tanto de los transpondedores como de los lectores y programadores.
- La forma de la etiqueta, es decir, el modo en que el dispositivo es encapsulado para formar la etiqueta. Algunas aplicaciones pueden requerir carcasas robustas mecánica o químicamente, o de alta tolerancia a las variaciones de la temperatura, debido a las condiciones de trabajo a las que deben funcionar. El encapsulado en dichas circunstancias puede representar una proporción significativa del coste total del transpondedor (el 30%).
- La frecuencia de trabajo de la etiqueta. En general, los transpondedores de baja frecuencia son más baratos que los de alta frecuencia.
- El tipo de etiqueta: posibilidades de lectura/escritura, activas o pasivas. Los tags pasivos son más baratos que los activos.

Lectores

Un lector o interrogador es el dispositivo que proporciona energía a las etiquetas, lee los datos que le llegan de vuelta y los envía al sistema de información. Asimismo, también gestiona la secuencia de comunicaciones con el lector.

Con el fin de cumplir tales funciones, está equipado con un módulo de radiofrecuencia (transmisor y receptor), una unidad de control y una antena. Además, el lector incorpora un interfaz a un PC, host o controlador, a través de un enlace local o remoto: RS232, RS485, Ethernet, WLAN (RF, WiFi, Bluetooth, etc.), que permite enviar los datos del transpondedor al sistema de información.

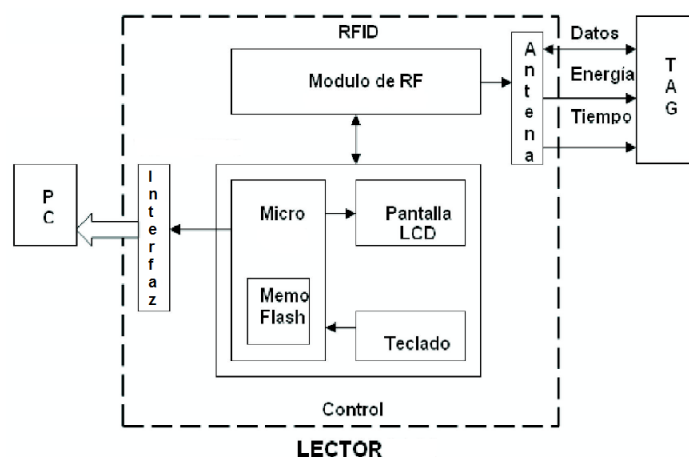


Fig. 3.25. Diagrama de bloques de un lector RFID [15].

Los lectores pueden variar su complejidad considerablemente dependiendo del tipo de transpondedor que tengan que alimentar y de las funciones que deban desarrollar. Una

posible clasificación los divide en fijos o móviles dependiendo de la aplicación que se considere.

- Los dispositivos **fijos** se posicionan en lugares estratégicos como puertas de acceso, lugares de paso o puntos críticos dentro de una cadena de ensamblaje, de modo que puedan monitorizar las etiquetas de la aplicación en cuestión.
- Los lectores **móviles** suelen ser dispositivos de mano. Incorporan una pantalla LCD, en teclado para introducir datos y una antena integrada dentro de una unidad portátil. Por esta razón, su radio de cobertura suele ser menor.



Fig. 3.26. Lector móvil Motorola MC3190-Z [17] (izquierda) y lector fijo Intermec IV7 [18] (derecha).

Programadores

Los programadores son los dispositivos que permiten escribir información sobre la etiqueta RFID. La programación se realiza una vez sobre las etiquetas de sólo lectura o varias veces si las etiquetas son de lectura/escritura. Es un proceso que generalmente se suele llevar a cabo antes de que el producto entre en las distintas fases de la fabricación.

El radio de cobertura al que un programador puede operar, es generalmente menor que el rango propio de un lector, ya que la potencia necesaria para escribir es mayor. En ocasiones puede ser necesario distancias próximas al contacto directo.

Un tipo especial de programador es la impresora RFID. Existen impresoras con capacidad de lectura/escritura, que permiten programar las etiquetas a la vez que se imprime con tinta información visible. Antes de realizar la escritura de la etiqueta, deben introducirse los datos deseados en la impresora. Una vez escritos, un lector a la salida comprueba la fiabilidad de los datos. Evidentemente este tipo de programación debe realizarse sobre etiquetas especiales hechas de materiales flexibles y que permiten la impresión en su exterior. Algunos sistemas comerciales con este tipo de etiquetas son fabricados por Zebra y Printronix.



Fig. 3.27. Impresora RFID Zebra ZM400 [19].

Middleware

El middleware es el software que se ocupa de la conexión entre el hardware de RFID y los sistemas de información. Es el responsable de la calidad y usabilidad de las aplicaciones basadas en RFID. Sus funciones principales son:

- Adquisición de datos. El middleware es responsable de la extracción, agrupación y filtrado de los datos procedentes de múltiples lectores RFID en un sistema complejo.
- Encaminamiento de los datos. El middleware dirige los datos al sistema apropiado dentro de las redes de elementos y sistemas RFID.
- Gestión de procesos. El middleware se puede utilizar para disparar eventos en función de las reglas de la organización empresarial donde opera, por ejemplo, envíos no autorizados, bajadas o pérdidas de stock, etc.
- Gestión de dispositivos. El middleware se ocupa también de monitorizar y coordinar los lectores RFID, así como de verificar su estado y operatividad, y posibilita su gestión remota.

Muchos de los middleware desarrollados o en desarrollo se ajustan a los estándares de EPCglobal, conocidos como Savant. La especificación Savant ordena los componentes del middleware de acuerdo a sus funciones.

Debido al reciente interés que ha surgido en el middleware, han aparecido gran cantidad de suministradores, aunque no se puede decir que en la actualidad exista ninguno que sea dominante. Algunos de los actores en el mercado en este momento son:

- Proveedores de software de aplicación empresarial, que ofrecen adiciones RFID a las aplicaciones de software empresarial existentes. Como ejemplo tenemos Provia, Maniatan Associates y RedPrairie.
- Proveedores de software de infraestructura, como Sun, IBM, Oracle, SAP, y Microsoft, que están ampliando sus productos middleware existentes para incluir RFID.

- Los fabricantes de equipamiento RFID extienden sus líneas de producto y se introducen en el mercado del middleware. Como ejemplos tenemos Zebra, Check Point e Intermec.
- Empresas recién llegadas a este ámbito, como GlobeRanger, OutSystems, ConnecTerra y Data Brokers, ofrecen productos para filtrado de datos y gestión y aplicación de reglas de negocio empresarial.

Sistema de información

El principal objetivo de la aplicación software es gestionar y tratar los datos recibidos por el lector. El sistema debe ser lo suficientemente robusto para poder manejar las múltiples lecturas que permiten realizar los sistemas RFID, coordinar tiempos y flujos de información, gestionar los distintos eventos, soportar las realimentaciones de los usuarios, introducir las actualizaciones del sistema cuando sea requerido e integrarlo con otros sistemas de información.

Algunos de los sistemas de información con los que se puede integrar un sistema RFID son: el sistema de planificación de recursos ERP (Enterprise Resource Planning), el sistema de gestión de almacenes WMS, (Warehouse Management System), el sistema de albaranes y comprobantes de entrega POD (Proof Of Delivery) o el sistema de comprobantes de recogida POC (Proof Of Collection).

3.2.5.3. Tipos de sistemas

Sistemas de baja frecuencia (135KHz)

Los sistemas RFID de baja frecuencia suelen emplear etiquetas pasivas y utilizan para su funcionamiento el acoplamiento inductivo.

En el caso de etiquetas pasivas, la capacidad de almacenamiento disponible es baja, de alrededor de 64bits. Si se trata de etiquetas activas, esta capacidad aumenta hasta los 2kbits. La tasa de transferencia de datos suele estar entre 200bps y 1kbps.

Al tratarse de un sistema inductivo, el campo magnético decrece muy rápidamente con la distancia (con el inverso del cubo de la distancia) y con las dimensiones de la antena. Este hecho puede verse como una ventaja en aplicaciones donde se requiera que la zona de cobertura esté estrictamente limitada a un área pequeña. Las etiquetas pasivas suelen poseer una cobertura que alcanza como mucho los 0.5m, mientras que las etiquetas activas pueden superar los 2m, aunque estos rangos dependen de la potencia, construcción, configuración de la antena y tamaño.

La penetración en materiales no conductores es buena, pero no funcionan bien con materiales conductores. Este problema se incrementa con la frecuencia. Además son muy susceptibles a interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia.

Se puede utilizar por ejemplo para control de accesos, identificación de animales, gestión de bienes, identificación de vehículos y contenedores, y como soporte a la producción.

Sistemas de alta frecuencia (13,56MHz)

La mayoría de los sistemas que trabajan a 13.56MHz utilizan etiquetas RFID pasivas y su principio de funcionamiento básico, al igual que en baja frecuencia, se basa en el acoplamiento inductivo.

Las etiquetas suelen poseer capacidades típicas que van desde 512bits hasta 8kbits, divididos en sectores o bloques que permiten direccionar los datos. Típicamente la velocidad de datos suele ser de unos 25Kbps (menor si se incluyen algoritmos de comprobación de errores de bit). También existen dispositivos con tasas superiores a 100Kbps. A esta frecuencia, los sistemas RFID son capaces de leer aproximadamente 40 etiquetas por segundo. Las etiquetas pasivas poseen un radio de cobertura de alrededor de 1m.

Su inmunidad al ruido por interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia es mejor que para los sistemas anteriores. La orientación de la etiqueta puede ser un problema según aumenta la distancia, debido a las propiedades de los campos electromagnéticos. Este efecto puede contrarrestarse mediante la utilización de antenas de transmisión más complejas.

Al igual que en LF, los sistemas de HF son aptos para aplicaciones que requieran leer poca cantidad de datos y a pequeñas distancias. Es el caso de la gestión de maletas en aeropuertos, bibliotecas y servicios de alquiler, seguimiento de paquetes y aplicaciones logísticas en la cadena de suministros.

Sistemas de ultra alta frecuencia (433MHz, 860MHz, 928MHz)

Los sistemas RFID que trabajan a ultra alta frecuencia basan su funcionamiento en la propagación por ondas electromagnéticas para transmitir los datos y para alimentar la etiqueta en caso de que ésta sea pasiva.

Se pueden encontrar etiquetas activas y pasivas con capacidades que van desde los 32bits hasta los 4Kbits, normalmente divididos en páginas de 128bits para permitir direccionar los datos. La velocidad de transferencia empleada está en torno a los 28Kbps (menor si se incluyen algoritmos de comprobación de errores de bit), y permite la lectura de unas 1000 etiquetas por segundo aproximadamente.

Las etiquetas de UHF pasivas pueden alcanzar una cobertura de 3 ó 4m. Trabajando con etiquetas activas y a la frecuencia más baja, 433MHz, la cobertura puede alcanzar los 10m. Sin embargo, estos datos pueden estar influenciados significativamente por las regulaciones de potencia permitida que tienen los diferentes países.

Posee una buena penetración en materiales conductores y no conductores, pero presenta dificultades ante la presencia de líquidos (agua). Su inmunidad al ruido por interferencias electromagnéticas industriales de baja frecuencia es mejor que para los sistemas de baja frecuencia, pero debe considerarse la influencia de otros sistemas de UHF operando en las proximidades. La orientación de la etiqueta también puede resultar un problema a esta frecuencia.

Estos sistemas son aptos para aplicaciones que requieran distancias de transmisión superiores a las bandas anteriores, como en la trazabilidad y seguimiento de bienes, o en la logística de la cadena de suministros.

Sistemas en frecuencia de microondas (2.45GHz, 5.8GHz)

Para estos sistemas hay disponibles etiquetas activas y pasivas con capacidades que van desde 128bits hasta 512Kbits, y que pueden dividirse en sectores o bloques para permitir direccionar los datos. La velocidad de transmisión típica está por debajo de los 100kbps, aunque algunos dispositivos pueden alcanzar 1Mbps.

Buen rango de trabajo, abarcando regiones de entre 1 y 2m para dispositivos pasivos y hasta 15m o más, para dispositivos activos. Posee una buena penetración en materiales no conductores, pero no así en líquidos que contienen agua, donde el coeficiente de absorción es importante. Sufre reflexiones por metales y otras superficies conductoras, y es susceptible al ruido. Se trata de una banda de trabajo compartida.

Es apta para aplicaciones que requieran alta cobertura y velocidades de transmisión elevadas, como por ejemplo, automatización en la fabricación, control de accesos, peaje de carreteras, logística de la cadena de suministros y aplicaciones logísticas militares.

3.2.5.4. Normalización y regulación

Estándares

Existen numerosos organismos regulatorios que influyen en mayor o menor medida en la estandarización de la tecnología RFID. La ISO ("International Organization for Standardization") [20] define estándares comerciales e industriales a nivel mundial. La IEC ("International Electrotechnical Commission"), por su lado, promueve la cooperación internacional para la estandarización en los campos de la electrónica y las tecnologías. Ambos organismos definen los estándares ISO/IEC.

Estándares ISO/IEC para RFID	
11784 11785 14223	Contienen la estructura del código de identificación por radiofrecuencia para animales. El estándar ISO 14223 detalla el interfaz aire entre el lector y el transpondedor RFID basado en la condición de compatibilidad según la norma ISO 11784-5.

10536 14443 15693	Definen las características físicas, el interfaz aire y la inicialización, y los protocolos anti-colisión y de transmisión de tarjetas inteligentes (“vicinity cards” y “proximity cards”). Estas tarjetas se pueden utilizar para una o múltiples aplicaciones (control de acceso, autenticación de usuarios, prepago).
10374	Especifica todos los requisitos de usuario para la identificación automática de contenedores de carga, incluyendo sistemas de identificación del contenedor, codificación de datos, criterios de rendimiento y seguridad.
15961 15962 15963	Estándares para las técnicas de identificación automática y adquisición de datos para gestión de objetos. Incluyen protocolo de datos, interfaz de aplicación, reglas de codificación de datos e identificación única.
Series 18000	Las normas ISO 18000 1 a 7 definen los parámetros para el interfaz aire en las frecuencias aceptadas de forma internacional: 135 kHz, 13.56 MHz, banda UHF, 2.45 GHz y 5.8 GHz. La norma 18046 se centra en los métodos de prueba de rendimiento de tags y lectores, mientras que la norma 18047 se ocupa de los test de conformidad de los dispositivos. Este estándar es similar al de EPCGlobal.

Tabla 3.4. Estándares ISO/IEC para RFID [20].

La serie ISO/IEC 18000 se utiliza conjuntamente con otros estándares de capas superiores que definen el resto de funcionalidades. En la siguiente tabla se describen los estándares de esta serie que definen el interfaz aire de un sistema RFID.

Estándar ISO/IEC - Serie 18000	
18000-1	Parámetros genéricos para el interfaz aire en todas las frecuencias.
18000-2	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones por debajo de 135 kHz.
18000-3	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 13.56 MHz.
18000-4	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 2,45 GHz.
18000-5	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 5.8 GHz.
18000-6	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones desde 860 a 960 MHz. La ISO 18000-6A y B especifican el interfaz aire para RFID pasivas en la banda UHF (900 MHz).
18000-7	Parámetros para el interfaz aire para comunicaciones a 433 MHz.

Tabla 3.5. Estándar ISO/IEC - Serie 18000 [20].

Legislación

Adicionalmente a la regulación del espectro radioeléctrico y a la estandarización de la tecnología, existen otras consideraciones legales a nivel internacional que afectan al desarrollo e implantación global de la tecnología RFID, y que hay que tener en cuenta en los proyectos que incluyan esta tecnología.

Para LF y HF encontramos que existe una legislación homogénea en todo el mundo. Sin embargo, en la banda UHF, al estar aún en desarrollo, no se ha llegado a dicha homogeneización.

En Estados Unidos, sin tener en cuenta las leyes individuales aprobadas por los distintos estados que limitan o regulan el uso de la tecnología, la FCC ("Federal Communications Commission") ha aprobado que los lectores de RFID en la banda UHF puedan operar con una potencia máxima de transmisión de 4 W, el doble que en Europa. El ancho de banda permitido para la comunicación es también mayor que el aprobado en Europa, lo que permite instalar una mayor cantidad de lectores en un mismo emplazamiento (mayor densidad).

Estas restricciones de potencia y ancho de banda de comunicación en Europa se deben a la coincidencia de la banda UHF con la utilizada por los móviles GSM. Actualmente, con la aprobación en 2004 del estándar EN 302 208 de la ETSI, la potencia máxima que pueden utilizar los equipos es de 2 W, en la banda de 865 a 868 MHz. En España ya se ha aprobado su utilización, eliminando la solicitud de licencia que era necesaria previamente.

En otros países también existen diferencias regulatorias. En China, siendo uno de los mercados con mayores expectativas, aún no existe regulación oficial para la banda UHF.

3.2.5.5. Near Field Communication (NFC)

Fundamentos de la comunicación

Este tipo de comunicación se realiza por acoplamiento magnético entre las antenas de espira de dos elementos NFC. Cuando un dispositivo NFC, alimentado eléctricamente, se acerca lo suficiente a otro, el campo magnético creado por el primero es capaz de inducir una corriente en el segundo de tal forma que pueda establecerse la comunicación y, por lo tanto, la transferencia de datos entre ellos. Existen dos clases de dispositivos NFC:

- **Activos:** Los que son capaces de crear su propio campo de RF utilizando para ello alimentación eléctrica (baterías normalmente). Se corresponden, principalmente, con los smartphones.
- **Pasivos:** Si la alimentación que reciben procede del campo de RF de otro dispositivo. Aquí se incluirían las etiquetas NFC.

A continuación se pueden observar los diferentes tipos de etiquetas NFC definidas por el NFC Forum [22]:

Tipo	Estándar	Modos	Memoria	Velocidad
Tipo 1	ISO 14443A	Solo lectura	96 bytes	106 Kbit/s
		Lectura/Escritura	Ampliable a 2 Kbytes	
Tipo 2	ISO 14443A	Solo lectura	48 bytes	106 Kbit/s
		Lectura/Escritura	Ampliable a 2 Kbytes	
Tipo 3	Sony FeliCa	Solo lectura	1 Mbytes	212 Kbit/s ó
				424 Kbit/s
Tipo 4	ISO 14443A y B	Solo lectura	32 Kbytes	Hasta 424 Kbit/s
		Lectura/Escritura		

Tabla 3.6. Tipos de etiquetas definidas por el NFC Forum [22].

Por otra parte, dependiendo de la función que realice dentro de la comunicación (ser emisor o receptor), un dispositivo NFC puede ser:

- **Iniciador (initiator):** Si es quien inicia y controla el intercambio de información.
- **Objetivo (target):** Si es quien responde a los requerimientos del iniciador.

En este aspecto habría que decir que un dispositivo NFC activo puede actuar como iniciador o como objetivo, pero un dispositivo pasivo sólo puede ser objetivo.

Relacionado con las diferentes formas de actuar de los dispositivos comentadas anteriormente, el NFC Forum define dos modos de operación entre aquellos que desean establecer la comunicación:

- **Modo pasivo:** El Iniciador (activo), que posee una fuente de alimentación propia, es quien empieza la comunicación a una determinada velocidad de transferencia, generando el campo electromagnético que alimentará la circuitería del Objetivo (pasivo) y haciendo que éste pueda enviar su respuesta a la misma velocidad.

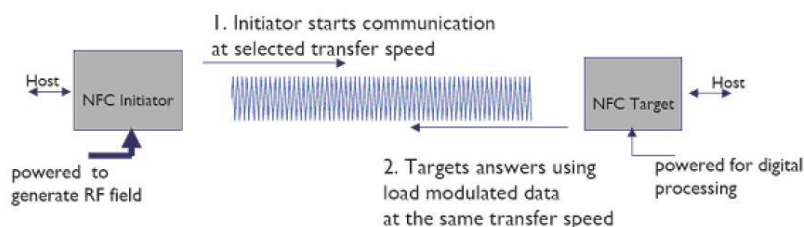


Fig. 3.28. Comunicación en modo pasivo [22].

- **Modo activo:** Tanto el Iniciador (activo) como el Objetivo (activo) disponen de una fuente de alimentación para generar señales electromagnéticas por lo que éste último no depende del primero cuando tiene que enviar datos, o lo que es lo mismo, uno de los dispositivos desactiva su campo de RF mientras espera a una respuesta.

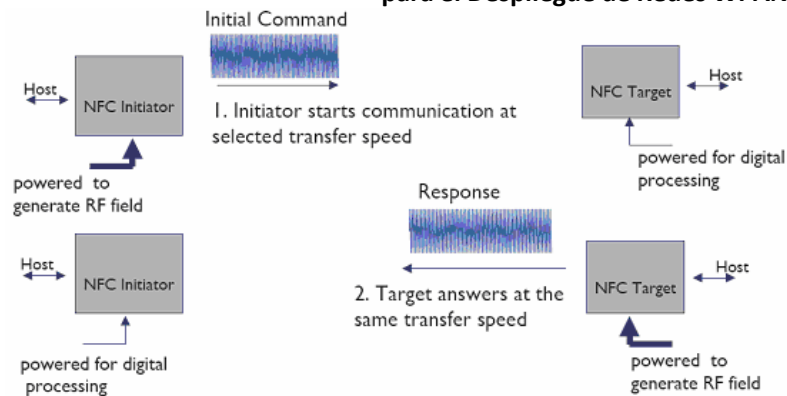


Fig. 3.29. Comunicación en modo activo [22].

Una comunicación NFC consta de cinco fases diferenciadas que cuentan con una función específica:

1. **Descubrimiento:** Los dispositivos involucrados inician el proceso de rastreo y reconocimiento.
2. **Autenticación:** Los dispositivos verifican si el otro dispositivo está autorizado o si deben implantar algún tipo de cifrado en la comunicación.
3. **Negociación:** En esta parte del establecimiento, los dispositivos definen parámetros como la velocidad de transmisión, la identificación del dispositivo, el tipo de aplicación, su tamaño, y si es necesario, también definen la acción a ser solicitada.
4. **Transferencia:** Una vez negociados los parámetros de la comunicación se puede comenzar con el intercambio de datos.
5. **Confirmación:** El dispositivo receptor confirma el establecimiento de la comunicación y la transferencia de información.

En esta tecnología se tiene la capacidad de poder implementar tres configuraciones distintas:

- **Modo lectura/escritura:** En este modo el dispositivo NFC puede leer los cuatro tipos de etiquetas NFC. Cuando se establece esta configuración los dispositivos NFC pueden intercambiar pequeñas cantidades de información como puede ser un texto en claro, una dirección web o un número de teléfono. Este modo tiene compatibilidad de RF (a nivel físico) con la ISO/IEC 14443 y FeliCa.
- **Modo emulación de tarjeta inteligente:** Este modo se utiliza para que el dispositivo NFC actúe como una etiqueta o una tarjeta inteligente (modo de funcionamiento pasivo). En este modo es posible utilizar las características de seguridad avanzadas, lo cual es muy interesante si utilizamos el dispositivo como medio de pago o para el almacenamiento y gestión de todo tipo de entradas y recibos.
- **Modo Peer-to-Peer:** Este modo sirve básicamente para el intercambio de pequeñas cantidades de datos utilizando el protocolo tradicional de NFC. Pero si es necesario un intercambio masivo de información, también se podría utilizar para establecer los parámetros de una comunicación inalámbrica basada en otra tecnología como Bluetooth o WiFi.

Especificaciones técnicas

La principal característica que identifica a la tecnología NFC es el hecho de haber sido desarrollada con objeto de ser utilizada en las comunicaciones inalámbricas de muy corto alcance, quedando determinada como tal, una distancia máxima no superior a los 10cm.

Los dispositivos NFC se pueden comunicar por proximidad, es decir, sin necesidad de haber contacto, con cuatro velocidades de transmisión de datos diferentes: 106, 212, 424 o 848 Kbit/s, aunque esta última no está reflejada en ISO/IEC 18092. Esta limitación se debe a que la tecnología NFC no está orientada a la transmisión masiva de datos, sino a pequeñas comunicaciones entre dispositivos.

La banda de frecuencias utilizada se corresponde con la banda ISM (Industrial, Scientific, and Medical) que está globalmente disponible para su uso, sin restricciones ni necesidad de licencia, lo que representa una ventaja para su implantación ya que el canal de transmisión es libre y no tiene un sobrecoste añadido. Concretamente, NFC tiene asignada la banda alojada en los 13,56 MHz, tradicionalmente asociada a las etiquetas RFID. También hay que decir que la mayor parte de la energía de radiofrecuencia se concentra en torno a ± 7 KHz, aunque una vez modulada la señal, el ancho de banda empleado es de 1,8 MHz.

En este sentido, ahora tocaría hablar de la modulación y codificación utilizada por esta tecnología. En la gran mayoría de las situaciones NFC trabaja con una modulación ASK, cuyo índice de modulación es del 10%, y con una codificación Manchester. Excepto en un caso concreto en el que se produce una variación: cuando la comunicación queda establecida en modo activo y a una velocidad de 106 Kbit/s. Aquí la modulación empleada sigue siendo ASK, pero su índice de modulación cambiaría a un 100%. Sin embargo, para la codificación de línea se emplearía en este caso un código de Miller Modificado.

Finalmente se debe comentar que el tiempo de configuración que necesita NFC para establecer una comunicación entre dos dispositivos es inferior a los 100ms y que su consumo de potencia es menor de 15mA.

Protocolos y estándares

NFC Interface and Protocol-1 (NFCIP-1)

Este estándar está definido en el ECMA-340 [23] y en la ISO/IEC-18092 [20]. En él se especifican los esquemas de modulación y codificación, y la arquitectura para las velocidades de transferencia de 106 a 424 Kbits/s, además de la banda de frecuencias utilizada. También define los modos de operación activo y pasivo, los métodos anticolidión para el modo activo y la selección de objetivo e inicialización para el modo pasivo.

NFC Interface and Protocol-2 (NFCIP-2)

Está definido en el ECMA-352 [23] y en la ISO/IEC-21481 [20]. NFCIP-2 especifica un método para escoger uno de entre estos tres modos de comunicación:

- Modo NFC (NFCIP-1)
- Modo Proximity card reader (ISO/IEC-14443)
- Modo Vicinity card reader (ISO/IEC-15693)

Es por ello que éste estándar provee una puerta de entrada para otros estándares diferentes que existen actualmente, es decir, permite la compatibilidad con otras tecnologías como Mifare, FeliCa, RFID, etc.

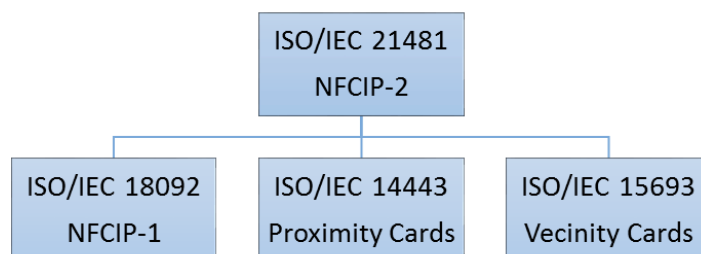


Fig. 3.30. Esquema de los estándares empleados por NFC.

NFC Data Exchange Format (NDEF)

Para que las etiquetas y los dispositivos puedan comunicarse entre sí, y para posibilitar la interoperabilidad entre dispositivos NFC y RFID de los diferentes fabricantes, el NFC Forum [22] definió un formato de datos estandarizado. Este formato, denominado NDEF (en español, formato de intercambio de datos NFC) propone una forma de organizar el contenido almacenado en la etiqueta o que viaja de un dispositivo a otro.

Un mensaje NDEF se caracteriza por estar compuesto de uno o más registros, cada uno de los cuales contienen, además del bloque de datos, una cabecera con la información de control como el identificador, la longitud de la información y el tipo concreto.

Una desventaja del formato NDEF es que toda la información es accesible por todos los dispositivos NFC. Esto hace que datos escritos previamente en una etiqueta por un dispositivo NFC puedan ser borrados o sobrescritos con otra información en cualquier momento y por cualquier dispositivo. Si esto fuera un inconveniente, podría ser solventado mediante el uso de claves de acceso.

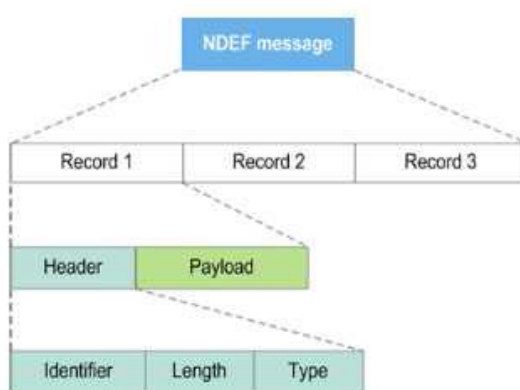


Fig. 3.31. Estructura del mensaje NDEF [22].

Record Type Definition (RTD)

La especificación RTD (en español, definición de tipo de registro) proporciona las pautas para describir los diferentes tipos de registros incluidos en un mensaje NDEF.

El NFC Forum [22] define dos clases. Por un lado estarían los NFC Forum External Types, que da a los organismos la posibilidad de especificar sus propios tipos independiente del NFC Forum y, por el otro, el NFC Forum Well-Known Types creados por dicha asociación para disponer de unos formatos comunes. Dentro de esta última categoría estarían los siguientes tipos:

- **Text Record Type:** Sólo texto simple, ninguna aplicación específica asignada.
- **Uniform Resource Identifier (URI) Record Type:** Correo electrónico, direcciones de Internet, números de teléfono u otros códigos de identificación.
- **Smart Poster Record Type:** Es una extensión del tipo de registro URI, que proporciona información adicional acerca del URI, como iconos o acciones recomendadas.
- **Generic Control Record Type:** Proporciona una estructura para cualquier actividad de control.
- **Signature Record Type:** Utilizada para certificar la veracidad de unos datos determinados.
- **Connection Handover:** Ofrece traspaso de una conexión NFC a otra tecnología de comunicación con mayor rendimiento de datos (por ejemplo, Bluetooth).

3.3. Trabajos relacionados con la materia

Aunque la investigación y el desarrollo de aplicaciones que hacen uso de WPAN/WBAN/WSN en entornos acuáticos son escasas debido a la complejidad del medio, en la literatura se pueden encontrar trabajos que pueden ayudar a aumentar el interés por este tipo de sistemas.

En [27] se puede ver como científicos chinos desplegaron una red de sensores inalámbrica en alta mar para monitorizar distintos parámetros medioambientales. También se ha estudiado la aplicación de redes WSN en zonas subacuáticas operando a bajas frecuencias [28]-[30], lo que da lugar a una variación en la problemática, ya que sólo existe un único medio de transmisión para las señales.

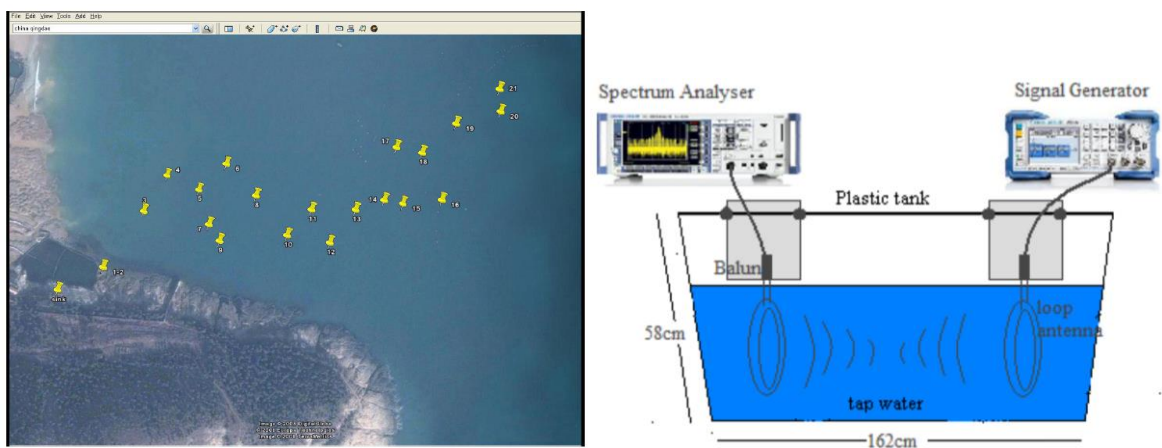


Fig. 3.32. Despliegue de una red de sensores en el océano (izquierda) [27] y bajo el agua (derecha) [30].

En cuanto a los deportes acuáticos, son pocos los estudios que hay al respecto, y todavía menos, los productos comercializados [31]. Algunos de los más interesantes aplican la tecnología inalámbrica a la natación [32].

En lo que respecta a la práctica del surf, uno de los proyectos con mayor potencial se denomina SurfSens, y lo desarrolla la empresa Pukas Surf en colaboración con el centro de investigación aplicada Tecnalía [33]. Consiste en una tabla de surf completamente equipada con sensores de presión, galgas extensiométricas, acelerómetros, giroscopios, brújula y GPS que registran la velocidad, los giros, la presión y muchos otros parámetros, con el objetivo de caracterizar tanto el comportamiento funcional de la propia tabla, como la técnica del surfista.



Fig. 3.33. Tabla Surfsens [33].

Otro de los trabajos de mayor relevancia que se debería comentar es el proyecto realizado por investigadores del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Santa Catarina, en Brasil, en el que desarrollaron e implementaron un sistema de sensorización remota en una tabla de surf, basado en tecnología ZigBee, que puede ser utilizado para transmitir datos y adquirir variables mediante el análisis experimental de la tensión mecánica de los materiales. Esta información puede ser tratada a posteriori con el propósito de, por ejemplo, obtener las conclusiones pertinentes respecto al rendimiento de los deportistas en sus entrenamientos [34].

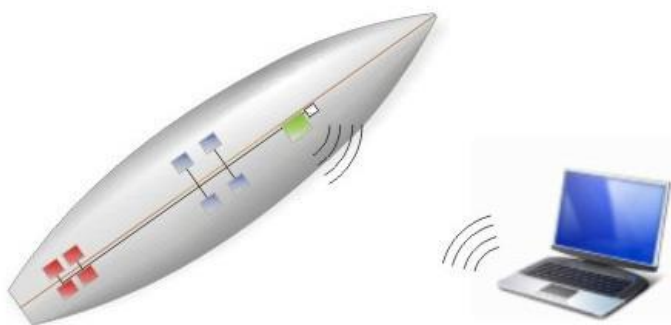


Fig. 3.34. Red de sensores embebidos en una tabla de surf [34].

En este sentido, en Portugal también desarrollaron un sistema que, mediante veinticuatro sensores de fuerza colocados bajo los pies del surfista y haciendo uso de un microcontrolador ATMEGA1280, podía determinar el posicionamiento de la propia persona

y el centro de presión (CoP). Además, una Unidad de Medición Inercial (IMU), junto con un acelerómetro ADXL335 y un giroscopio IDG500 proporcionaban información sobre la posición de la tabla de surf en relación con los ejes de fuerza gravitacional. Para recoger los datos adquiridos, el sistema utiliza una tarjeta SD, y para transmitirlos a un dispositivo externo como un ordenador, incorpora un módulo de WiFi [35].

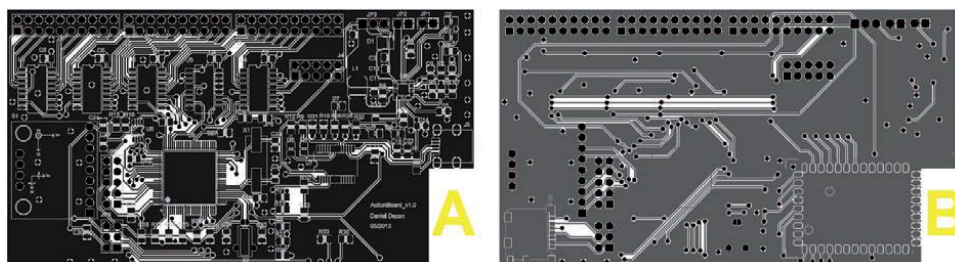


Fig. 3.35. Ambos lados de la placa electrónica sobre la que está montada todo el sistema [35].

Por otra parte, se pueden encontrar algunas patentes concedidas que guardan una estrecha relación con este deporte. De ellas cabe destacar una patente alemana y otra estadounidense que se describirán brevemente a continuación:

- ***Movement parameter recording device for surfing (DE 19718917 C1) [36]:*** publicada en 1999, éste dispositivo es capaz de determinar la velocidad relativa de la tabla de surf con respecto al agua a través de una serie de sensores incorporados, para posteriormente procesar las señales y mostrarlas en la pantalla que incluye o transmitirlos vía radio a un receptor externo.
- ***Surfing parameters gauge and transfer apparatus (US 7166005 B2) [37]:*** publicada en 2007, este aparato se fija en la tabla de surf para, de forma análoga al caso anterior, poder medir en tiempo real parámetros como la velocidad relativa, el tiempo o la distancia recorrida. Está compuesto por un módulo multifunción que contiene toda la electrónica necesaria (sensor, microcontrolador, etc.) y un módulo de RF que transmite la información inalámbricamente a un receptor que está conectado a su vez a un ordenador.

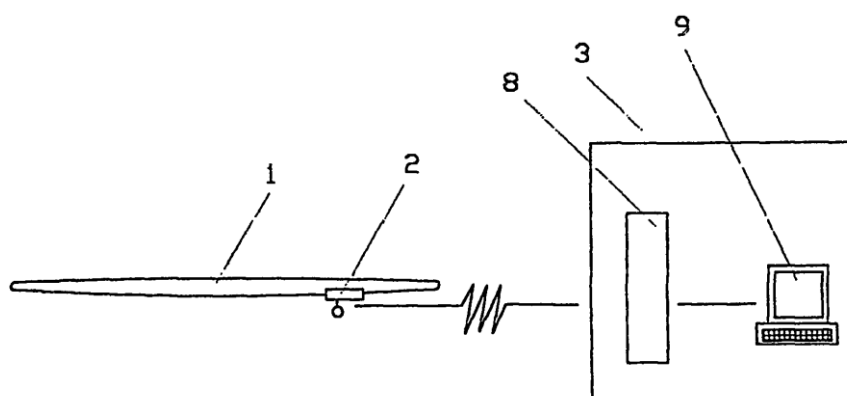


Fig. 3.36. Esquema de la patente US 7166005 B2 [37].

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1. Introducción

Como ya se ha comentado anteriormente, en este trabajo se va a realizar un estudio de cobertura de un radioenlace entre un surfista y una boya, estimando de la mejor manera posible la influencia de un entorno marítimo cuya complejidad es muy elevada.

Para ello, primero se comprobará el comportamiento de un transceptor inalámbrico en campo cercano y, utilizando un modelo de tabla real, se observará la influencia del material de ésta en la propagación del campo eléctrico. En segundo lugar se explicará detalladamente la técnica de trazado de rayos y los parámetros de simulación. Después, dado que el algoritmo en Matlab empleado no implementa el fenómeno de la dispersión difusa por superficies rugosas, habrá que añadir y modificar algunas líneas de código, realizando las correspondientes pruebas para comprobar su correcto funcionamiento.

A continuación se procederá a modelar los escenarios de la forma más realista posible e incorporando la tabla de surf, el ser humano y la boya. En estos escenarios se tendrá en cuenta, por un lado, el transmisor ubicado en la tabla o en la boya, y por el otro, con el transmisor en la tabla se variará la distancia del surfista a la boya para observar que ocurre. Una vez obtenidos los resultados de simulación relacionados con la dispersión difusa, se aproximará de forma analítica cómo puede afectar la difracción por un obstáculo situado en el trayecto entre emisor y receptor.

4.2. Comportamiento del sistema en campo cercano

En primer lugar se va a realizar un estudio sobre la evolución del campo eléctrico en zonas cercanas al transmisor para observar con detalle la influencia de la tabla de surf en el canal radioeléctrico. Con este fin se va a emplear el software de simulación CST (*Computer Simulation Technology*), que implementa el modelo de propagación FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*), mediante el cual se resuelven directamente las ecuaciones de Maxwell aproximándolas por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Para ello habrá que definir previamente una cuadrícula sobre el área de interés y determinar las condiciones iniciales.

Su coste computacional es muy elevado al igual que la precisión que se puede conseguir, por lo que estos modelos sólo son aconsejables en tareas de predicción de campo en pequeñas áreas, dejando los escenarios más amplios para otros modelos como el de ray-tracing.

En este caso para simular el comportamiento en campo cercano se utilizará una tabla de surf real colocando el transmisor en la parte trasera. En la Fig. 4.1 se puede ver, a modo comparativo, como se propaga el campo eléctrico a 868MHz y a 2.4GHz.

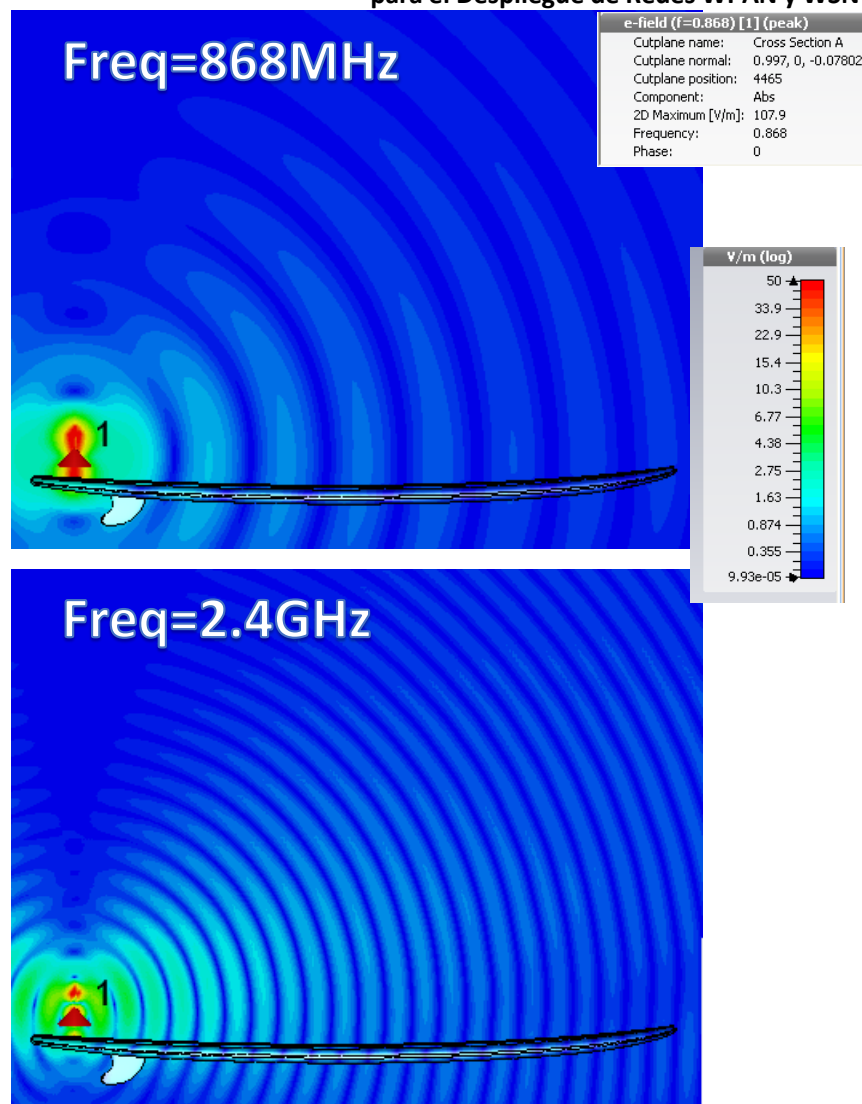
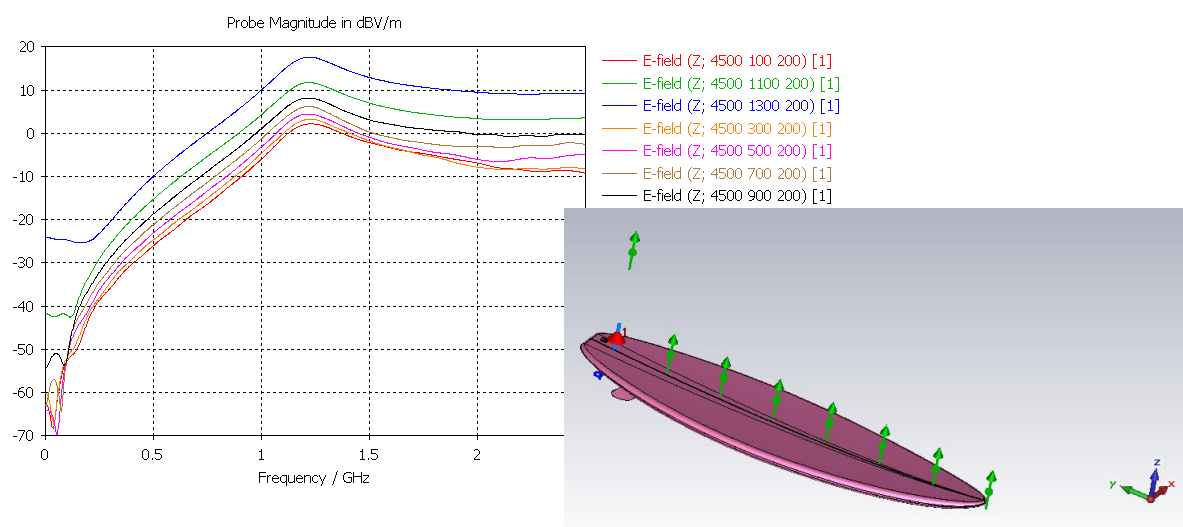


Fig. 4.1. Propagación del campo eléctrico a 868MHz y a 2.4GHz.

Por otro lado, en las gráficas de la Fig. 4.2 se observa la variación de la intensidad del campo eléctrico con la frecuencia en distintos puntos de la tabla.



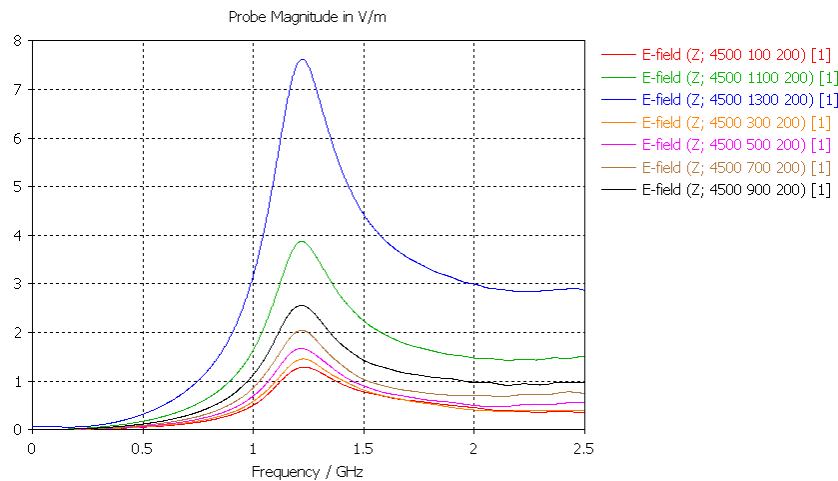


Fig. 4.2. Variación de la intensidad del campo eléctrico con la frecuencia a en los puntos marcados de la imagen derecha.

De las gráficas anteriores comprobamos que, la intensidad del campo eléctrico disminuye al alejarnos del transmisor, decreciendo más rápidamente en las zonas cercanas a este. En este sentido, el valor de la intensidad crece con la frecuencia hasta que, alrededor de 1.2GHz, aparece un pico de resonancia a partir del cual el campo empieza a decrecer, estabilizándose a 2GHz y dejando de depender con la frecuencia.

4.3. Metodología y parámetros

Para recrear todos los escenarios y obtener los datos de interés, se utilizó un software de trazado de rayos en tres dimensiones implementado en un entorno Matlab y basado en un algoritmo de Ray-Launching.

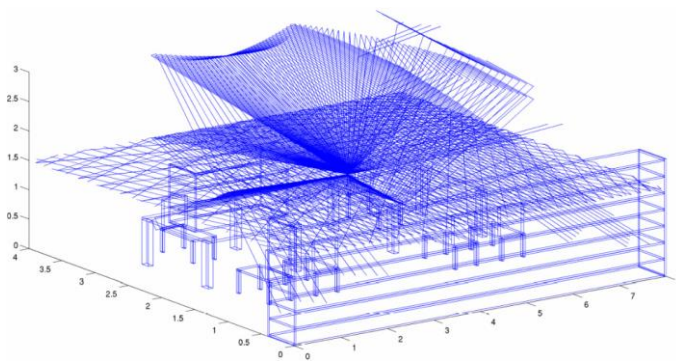


Fig. 4.3. Ejemplo de escenario interior en 3D con los rayos lanzados desde un transmisor en el centro.

En función de la resolución utilizada, el código divide el escenario en cuboides iguales y de menor tamaño de forma que, cada rayo se computa individualmente y el campo eléctrico de cada punto del escenario es la suma de todas las contribuciones de los rayos que los atraviesan. Al calcular la potencia recibida en cada punto del espacio, pueden crearse mapas de cobertura a una altura fija, como se muestra en la Fig. 4.2.

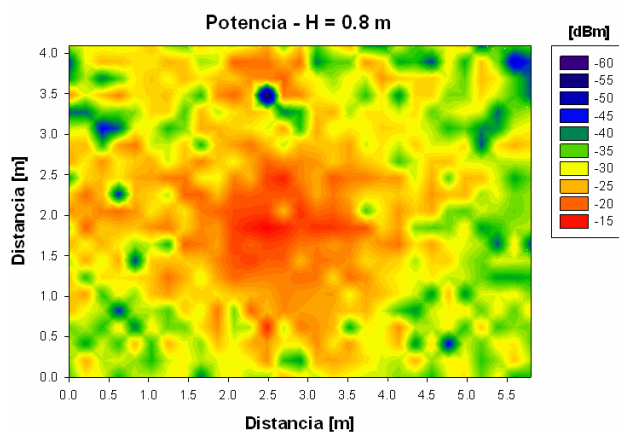


Fig. 4.4. Ejemplo de mapa de potencia recibida.

A pesar de lo que pueda parecer, una mayor resolución no implica unos mejores resultados. Si los cuboides son demasiado grandes (poca resolución) se pierde precisión en los datos y si los cuboides son muy pequeños (gran resolución) existen problemas de reflexión, refracción y difracción que hacen que los datos obtenidos se desvíen considerablemente de la realidad, por lo que al igual que antes se pierde exactitud, por no hablar del coste computacional que supone para una máquina procesar esa gran cantidad de cálculos. Consecuentemente, existe un compromiso que se deberá resolver en cada caso de estudio, realizando un análisis previo y calibrando de forma correcta el escenario, como se ha hecho en este proyecto.

Otra de las limitaciones del software está referida a la imposibilidad de generar objetos con formas curvadas. Es por ello que la tabla de surf se tuvo que aproximar por un prisma rectangular de dimensiones 175cm x 46cm x 4,5cm y hecha de poliestireno. La persona, de 170cm, también se representará con líneas rectas. En la Fig. 4.3 se puede ver el modelo de surfista utilizado en las simulaciones, junto con la localización habitual del transmisor, que estará a 11cm de uno de los extremos de la tabla.

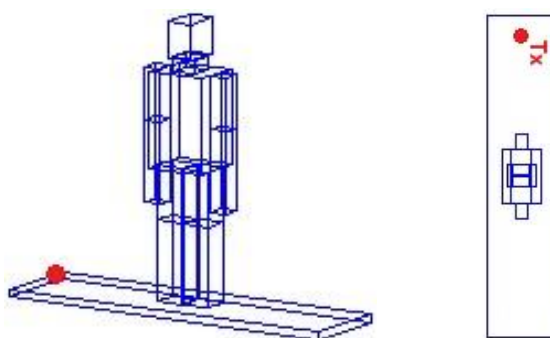


Fig. 4.5. Modelo de surfista: vista tridimensional (izquierda) y aérea (derecha).

Además, la boya también se modelará como un prisma rectangular, en este caso de metal, cuyo tamaño será de 150cm x 150cm x 200cm, y donde se ha optado por este material ya que es el que suelen contener las estructuras de las boyas oceanográficas, que a su vez se sostienen sobre un flotador de poliuretano elastómero de gran resistencia a impactos relleno de espuma de polietileno de célula cerrada que previene la absorción de agua (Fig. 4.4).

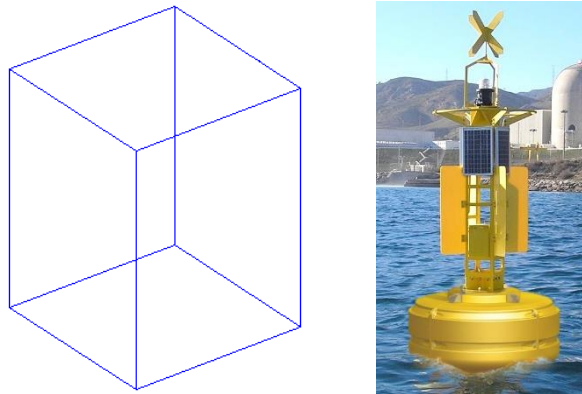


Fig. 4.6. Boya marítima: modelo Matlab (izquierda) y real (derecha).

Tras la introducción al método utilizado, es importante conocer los principales parámetros con los que se han simulado los escenarios:

- Potencia de transmisión de 10mW.
- Frecuencias de operación de 2,4GHz.
- Una única antena omnidireccional con polarización lineal vertical y ganancia de 0.82dBi.
- Cuboides de 1m^3 .
- Número de rebotes de los rayos igual a 6.
- Incremento de θ y ϕ del lanzamiento de rayos de la antena cada $\pi/180$.
- Materiales y propiedades eléctricas:

Objeto y material	Constante dieléctrica relativa, ϵ_r	Conductividad, σ (S/m)
Aire	1	0
Boya metálica	6,1546E+07	3,78E+7
Tabla de surf de poliestireno	2,5	1E-16
Agua salada	80	6

Tabla 4.1. Materiales utilizados y sus propiedades eléctricas.

4.4. Modelado de una superficie rugosa

La versión del algoritmo de trazado de rayos en 3D con la que se contaba hasta el momento, al suponer todas las superficies del escenario lisas, no implementaba el fenómeno de la dispersión difusa. Esto es lo primero que se tuvo que resolver ya que es fundamental para el desarrollo del proyecto.

Como se ha comentado en el apartado 3.1.3 para estimar la influencia de las superficies rugosas en la propagación radioeléctrica se suele tomar en consideración un coeficiente de reflexión efectivo dado por la siguiente expresión, según la teoría de Kirchhoff, y que es dependiente del coeficiente de reflexión especular, del ángulo de incidencia y de la desviación típica de la distribución de la altura de la superficie:

$$R_{rough} = R \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i \right) \right) \right]$$

Tras un periodo de investigación y aprendizaje sobre el funcionamiento del código de simulación, se encontraron dos formas de solucionar este problema: una consistía en hacer que el propio suelo del escenario fuese la superficie de agua rugosa y la otra en definir un prisma rectangular rugoso de un volumen determinado situado justo por encima del suelo y de dimensiones similares. En ambos casos, se tuvo que crear una nueva función llamada *refraccionobjeto.m* (anexo 8.1) que es, donde se debe modificar el parámetro σ_h para variar el grado de rugosidad, y la que calcula los rayos transmitidos y reflejados cuando existen choques. A partir de aquí en función de la solución tomada habrá que modificar unas líneas u otras del resto del código y hacer las pruebas necesarias para ver cuál es la mejor opción.

El escenario utilizado para hacer las pruebas de rugosidad era un cubo de dimensiones 5m x 5m x 5m, configurando el material de las paredes como si estuvieran hechas de aire, para evitar que las reflexiones en estas afectaran al resultado y pudieran interferir en la decisión final. En un caso el suelo era agua salada y en el otro se introdujo un obstáculo volumétrico también de agua salada (5m x 5m x 0.6m) (Fig. 4.7). El transmisor se situó en la posición (1, 1, 1) en el primero y en (1, 1, 1.6) en el segundo. Los parámetros de simulación utilizados fueron los que aparecen en el apartado 4.3 con la salvedad de que la resolución se cambió a 0.2m x 0.2m x 0.2m.

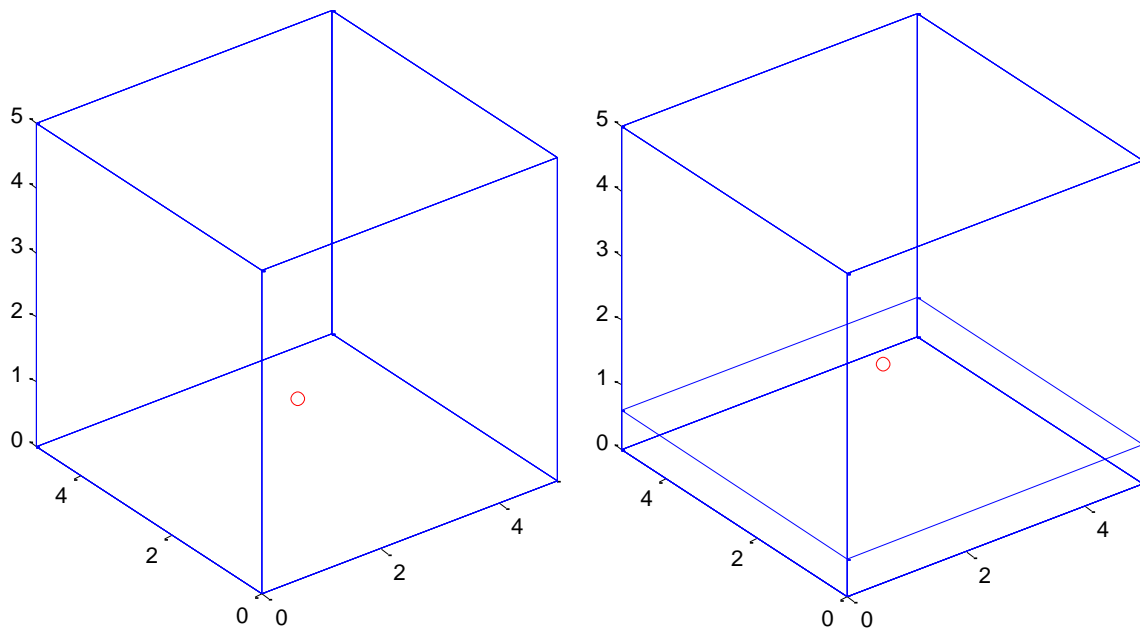
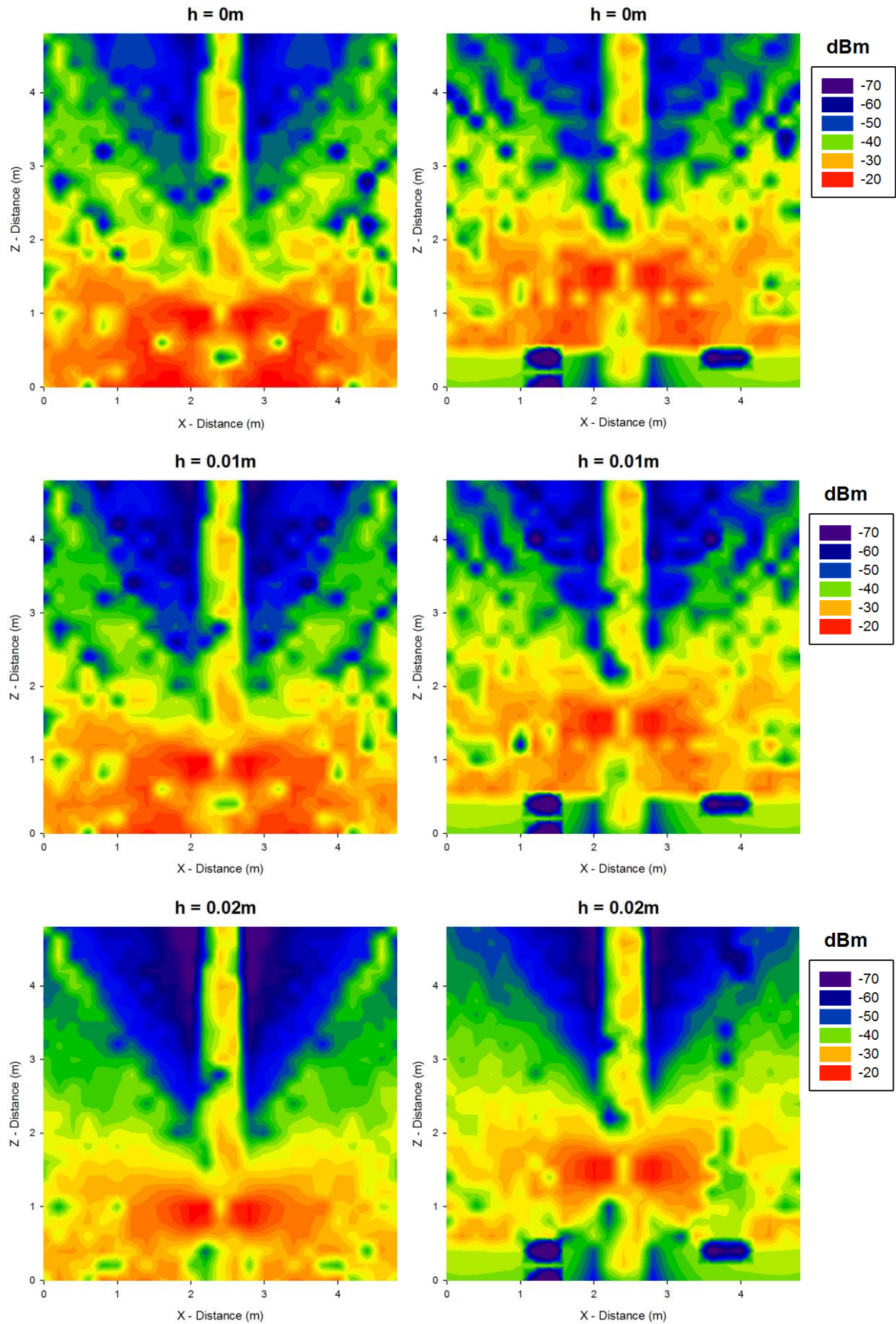


Fig. 4.7. Escenario de pruebas con suelo de agua (izquierda) y con obstáculo de agua (derecha).

Con estos escenarios se hicieron simulaciones para distintos valores de σ_h (altura de las olas del mar, también aparecerá como h más abajo), obteniendo mapas de cobertura en el plano XZ y radiales de potencia en el eje X a la misma altura que la antena. Estos aparecen a continuación de forma comparativa entre las dos opciones posibles.



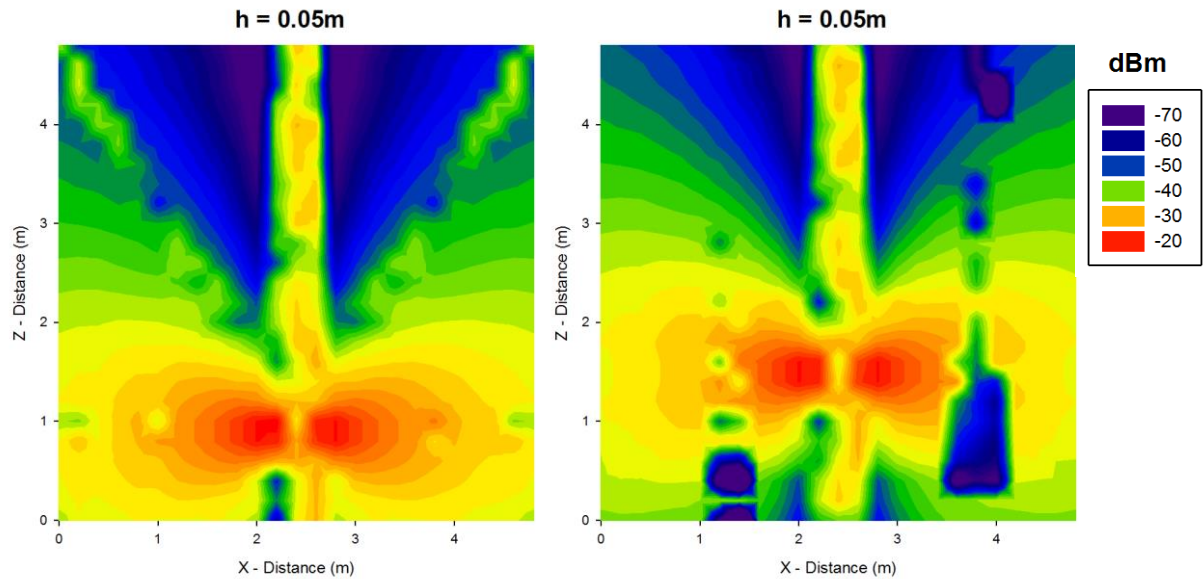
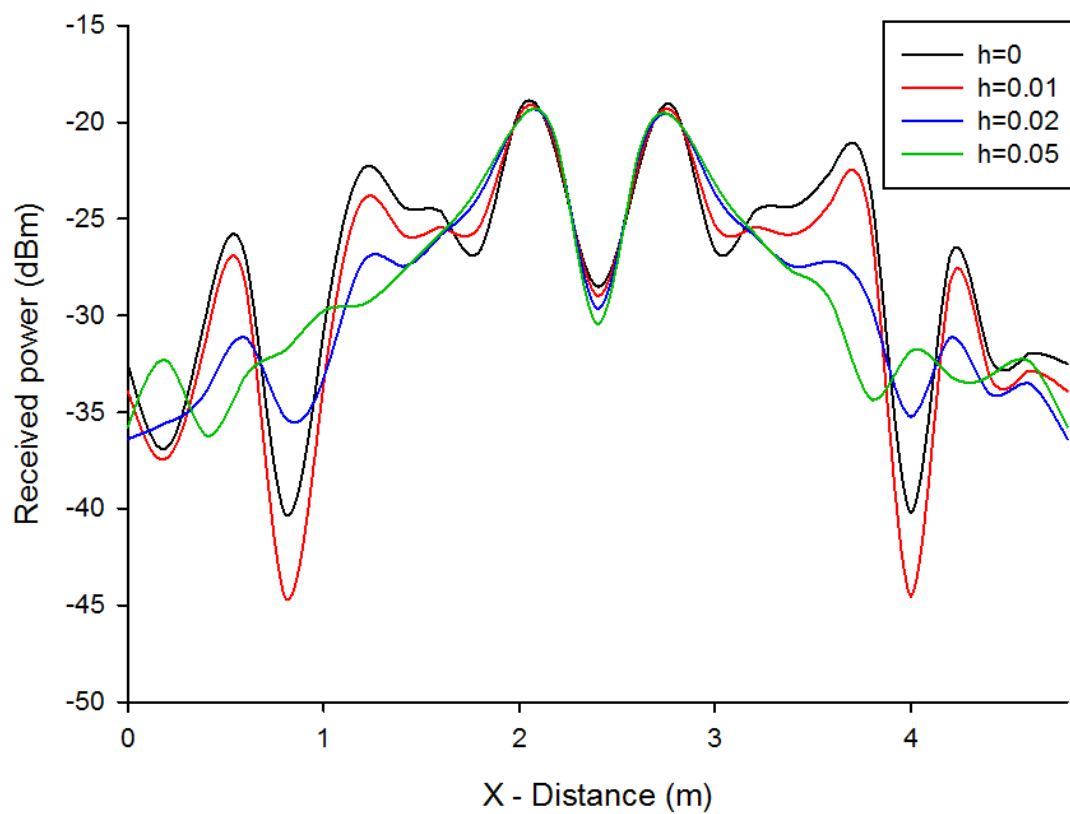


Fig. 4.8. Mapas de cobertura en el plano XZ para distintos valores de σ_h .



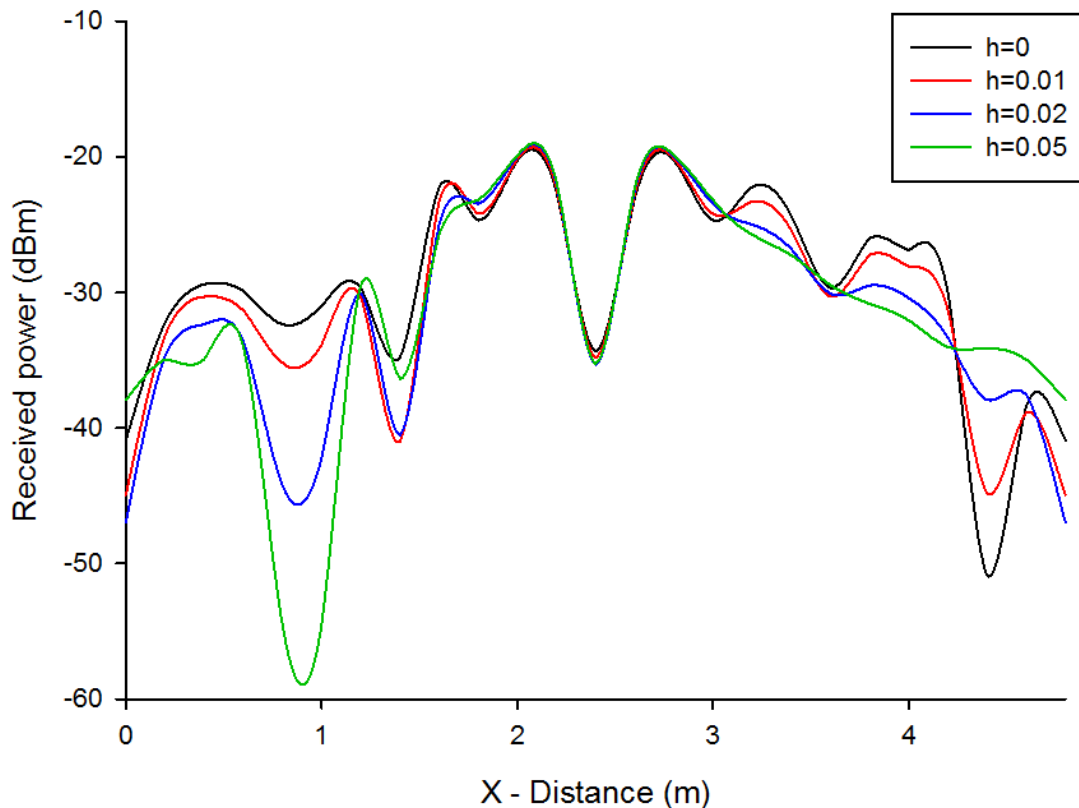


Fig. 4.9. Radiales de potencia a la altura del transmisor para distintos valores de σ_h .

A la vista de los resultados se puede decir que en ambos casos, a partir de un valor de $h=0,05\text{m}$, apenas existe una dependencia con la altura de las olas por lo que prácticamente toda la potencia es refractada. Además, en zonas cercanas a la antena los niveles de potencia son muy similares, y difieren en mayor medida en las zonas alejadas, siendo las radiales más simétricas en el primer caso que en el segundo, donde incluso se puede ver que en torno a 0.9m se produce una caída de potencia importante. En definitiva, aunque ambas alternativas ofrecen unos buenos resultados, aparentemente la primera parece ser la mejor opción, pudiendo ser la segunda más interesante en escenarios que contengan más de una superficie rugosa con distinto tipo de rugosidad.

4.5. Escenarios de simulación

4.5.1. Escenario 1

El primer escenario de simulación fue definido como una habitación de dimensiones $50\text{m} \times 20\text{m} \times 10\text{m}$. De forma similar a lo que sería un entorno exterior real, se establecieron todas las paredes y el techo como si estuvieran hechas de aire, mientras que el suelo se especificó como agua salada con cierta rugosidad. Este escenario contiene en su interior un surfista situado en la posición $(4.5, 2.5)$ en cuya tabla de surf se fija el transmisor, y una boya que está en $(45.5, 17.5)$.

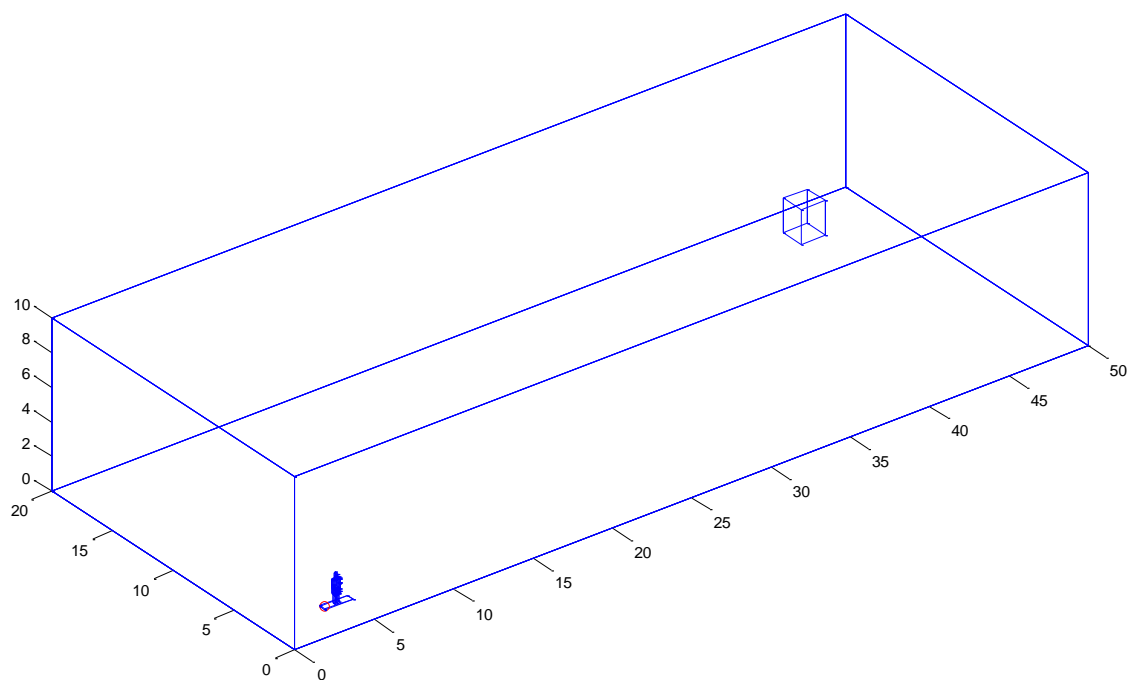


Fig. 4.10. Primer escenario de simulación.

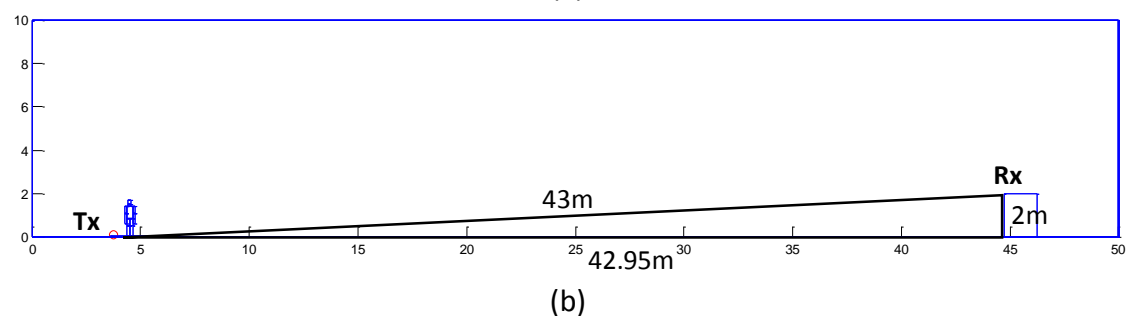
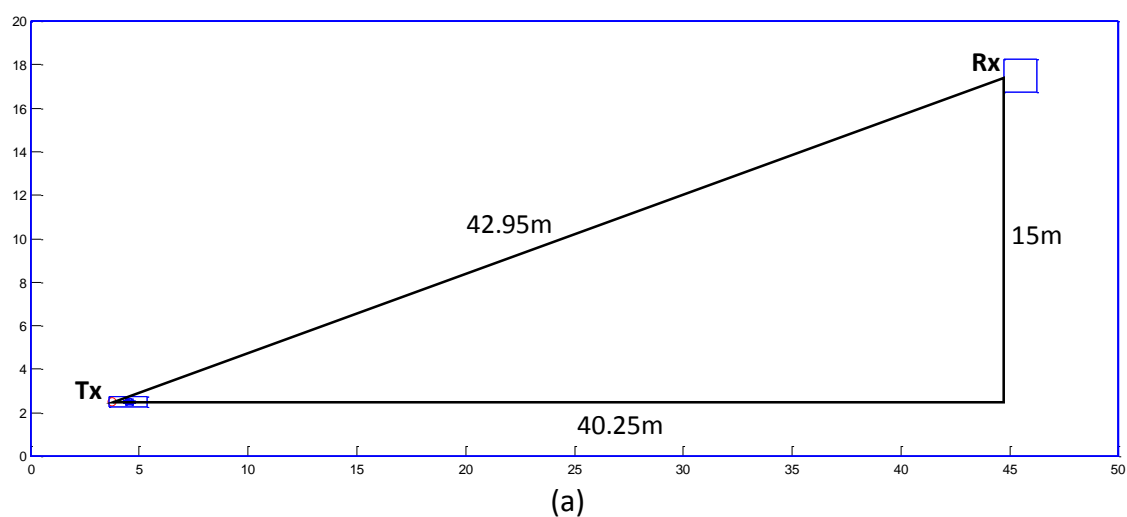
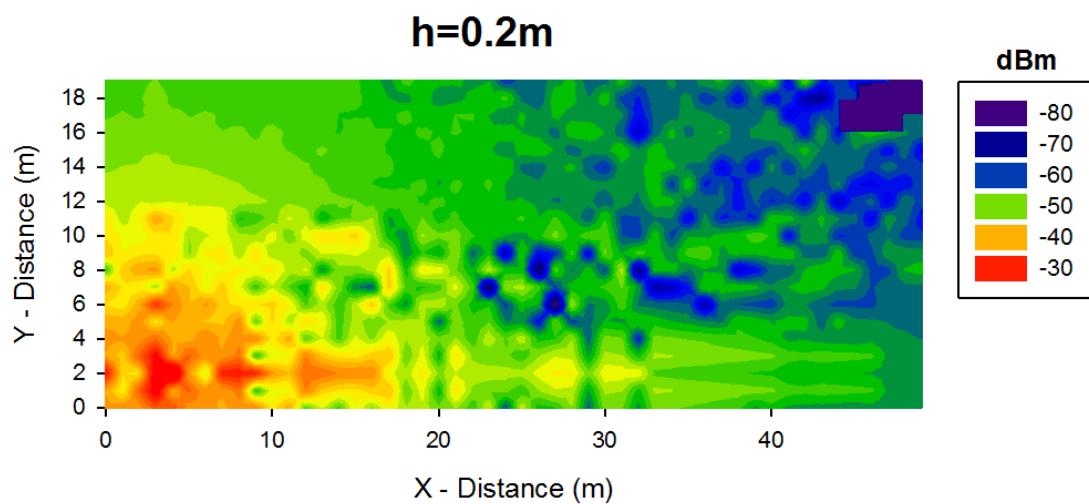
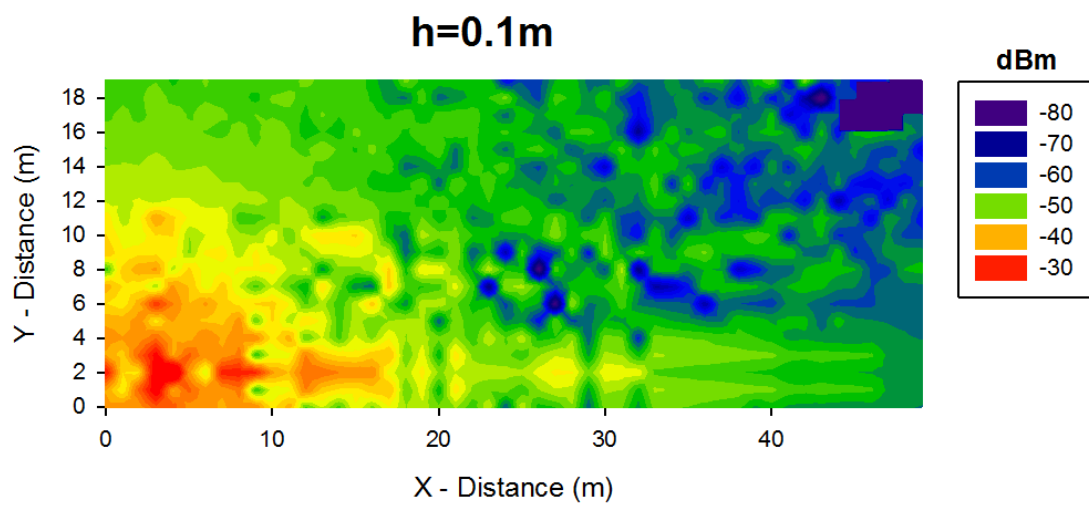
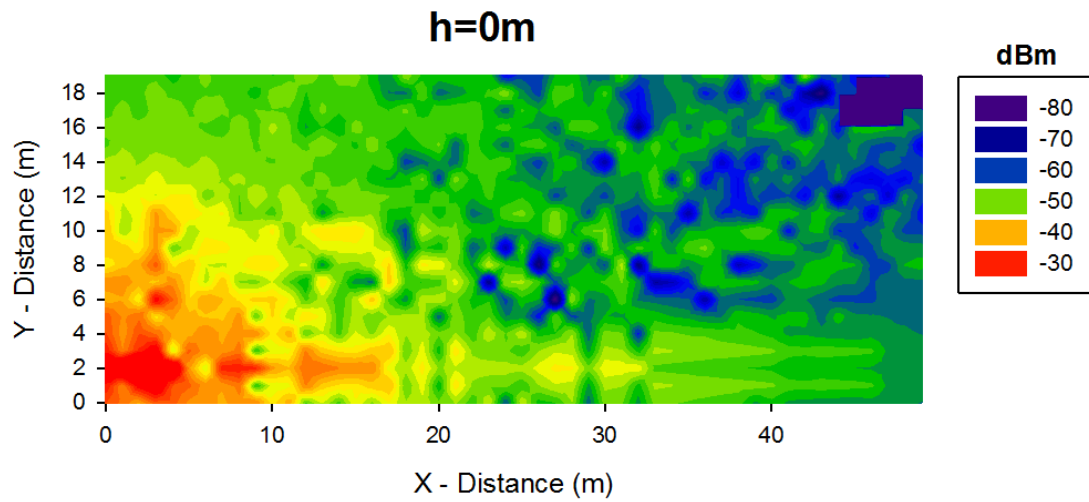


Fig. 4.11. Planos XY (a) y XZ (b) del escenario junto con la distancia Tx-Rx calculada por trigonometría.

Este escenario se simuló con los parámetros del apartado 4.3 para distintas alturas de las olas y los resultados obtenidos se pueden ver más abajo. Primero se representarán los planos bidimensionales a una altura de 2m y después las radiales de potencia.



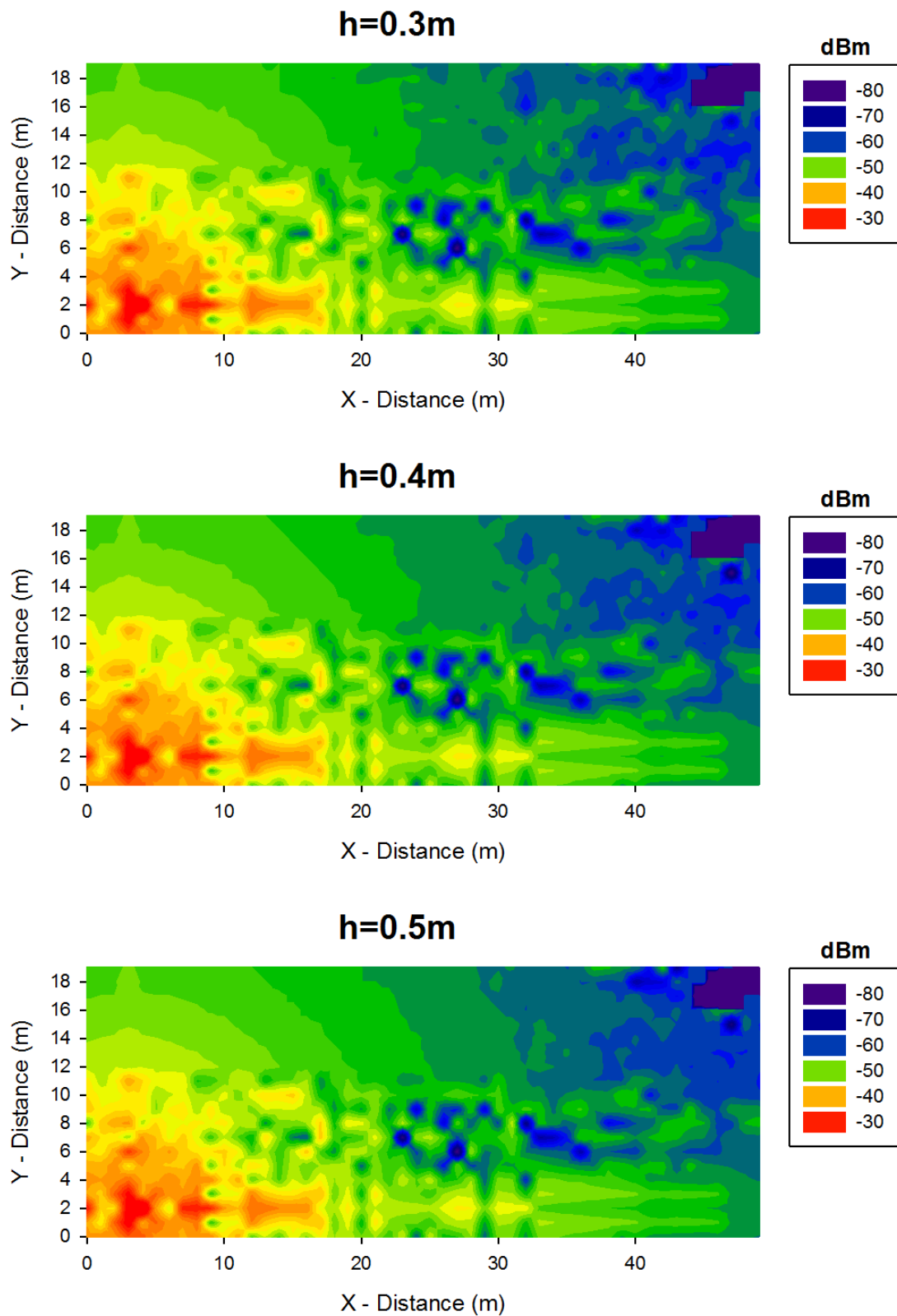


Fig. 4.12. Mapas de cobertura a una altura de 2m variando la altura de las olas cada 10cm.

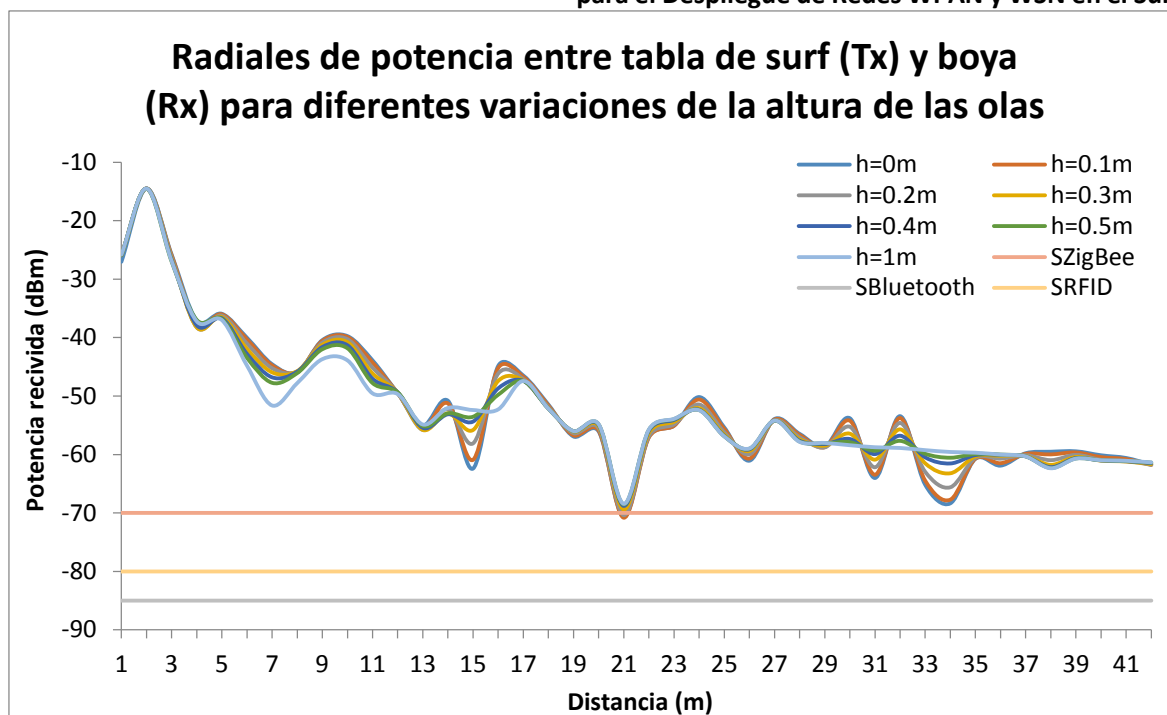


Fig. 4.13. Radiales de potencia variando la altura de las olas y sensibilidades de referencia.

Analizando estos resultados se observa que, como es lógico, al aumentar la rugosidad de la superficie las pérdidas por dispersión son mayores, por ejemplo, si comparamos el caso de una superficie lisa ($h=0$) con la rugosa tal que $h=1$ m se aprecia en torno a 1dB de atenuación adicional en este último caso. Además, a partir de una altura de las olas de 50cm no existe una dependencia significativa con el valor de esta ya que casi toda la potencia es refractada. Por último hay que decir que en cualquier caso la potencia que llega al receptor queda por encima de las sensibilidades mínimas de Zigbee, Bluetooth y RFID, aunque un poco más justo con la primera tecnología.

Hay que tener en cuenta que para cualquiera de las tecnologías utilizadas en este estudio, los dispositivos comerciales suelen mejorar las características de sensibilidad del estándar, e incluyen mecanismos en las capas OSI superiores que mitigan el efecto de las componentes multipath, por lo que al final el margen de seguridad visto antes es todavía más amplio.

4.5.2. Escenario 2

En el segundo escenario de simulación se analizará cómo cambia el comportamiento del canal radioeléctrico cuando la distancia de separación entre el surfista y la boya se va reduciendo. Es por ello que, por simplicidad a la hora de tratar los datos, se definirá un nuevo escenario similar al anterior pero con alguna ligera modificación, más específicamente, en este caso el surfista estará localizado en (4.5, 10) y la boya en (44.5, 10), permaneciendo el transceptor en la tabla de surf y fijando una rugosidad de $\sigma_h=0.3$ m. A partir de aquí se establecerán otros tres casos más en los que la boya se irá acercando al surfista 10m cada vez.

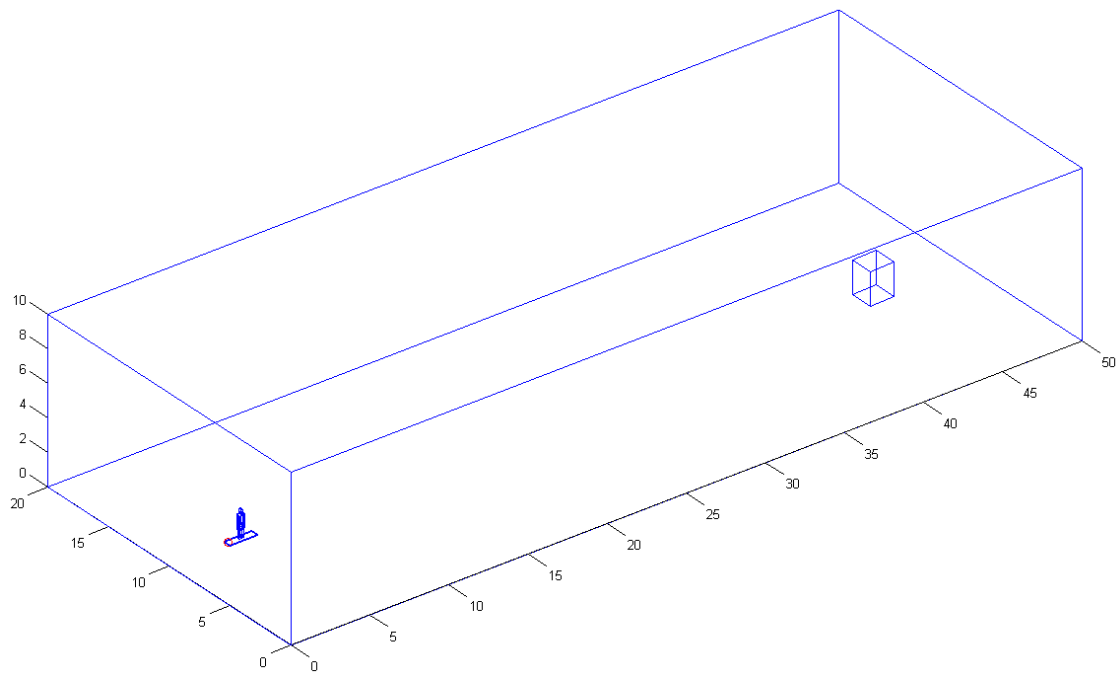
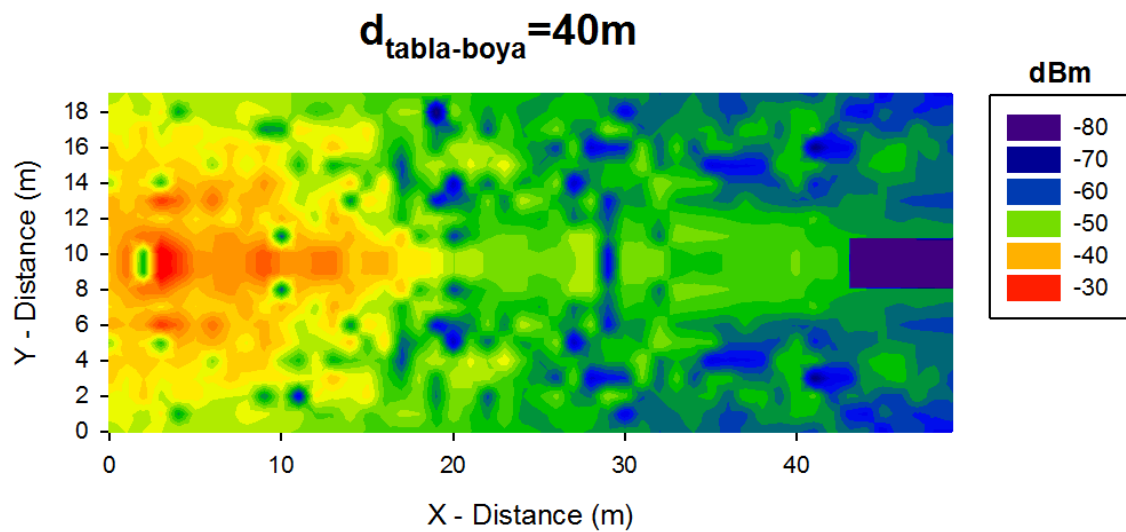


Fig. 4.14. Segundo escenario de simulación.

Para poder comparar las diferentes situaciones, se mostrarán los mapas de cobertura obtenidos a 2m de altura sobre la superficie y las radiales de potencia donde se puede ver claramente la evolución de la potencia con la distancia en el vano directo.



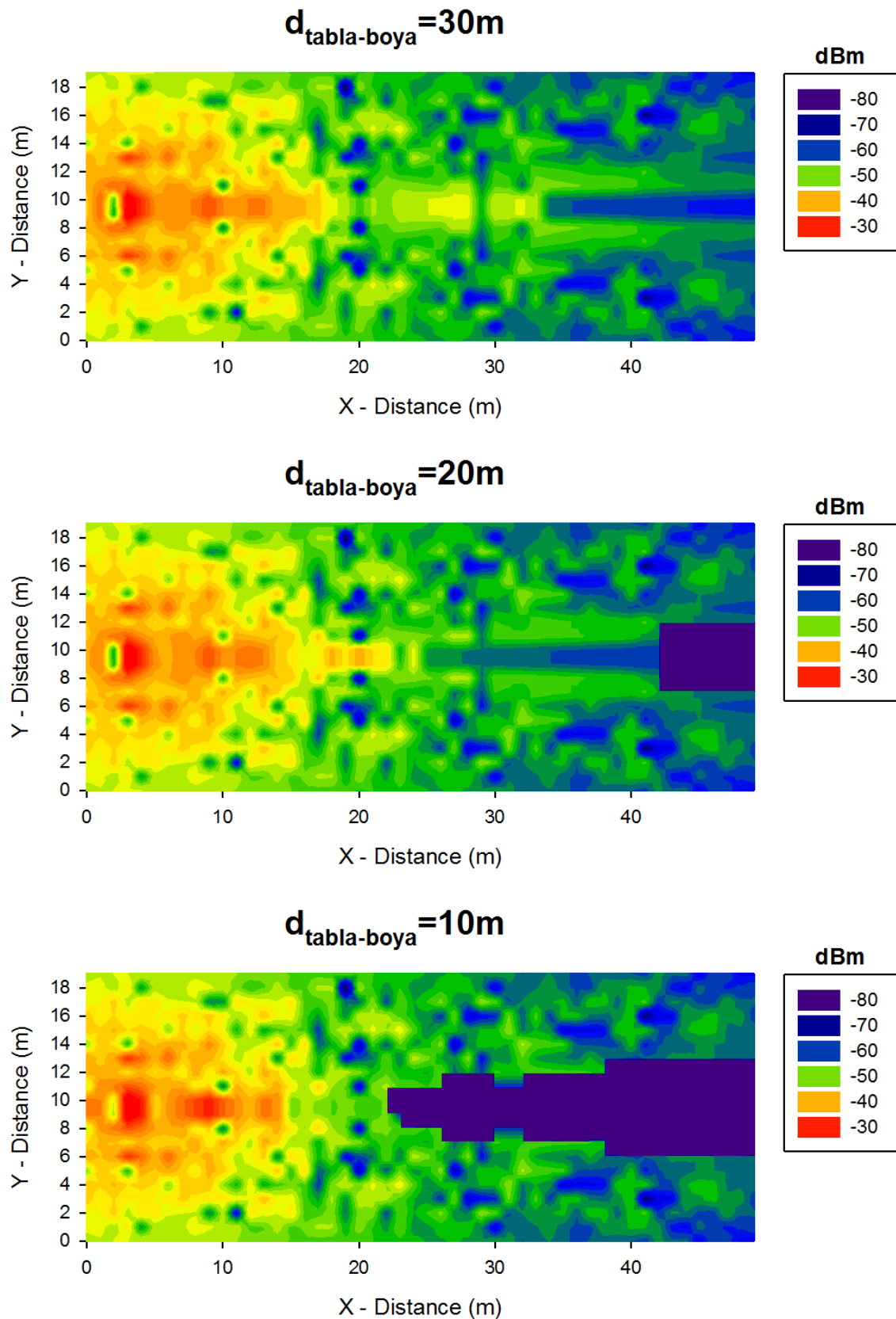


Fig. 4.15. Mapas de cobertura a una altura de 2m reduciendo la distancia de separación entre la tabla de surf y boya 10m cada vez.

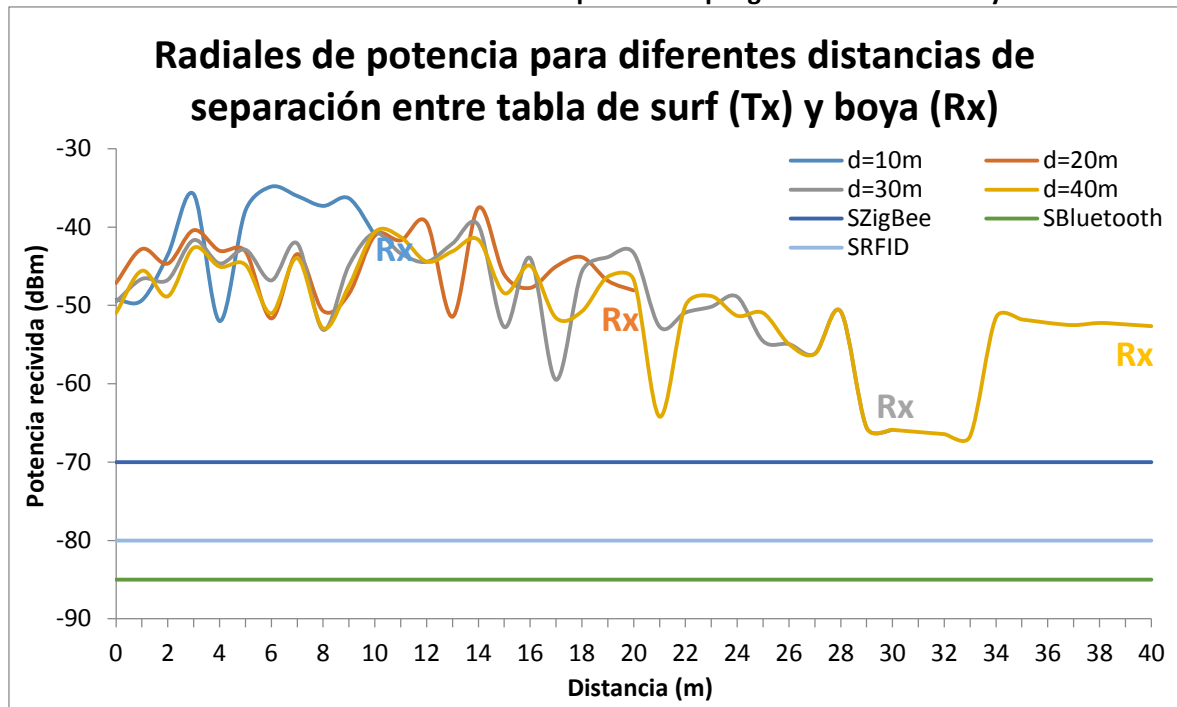


Fig. 4.16. Radiales de potencia para distintas distancias de separación entre transmisor y receptor.

Con estos resultados queda demostrado que al aumentar la separación entre transmisor y receptor, los niveles de potencia son menores, pero cabe destacar el caso de $d=30\text{m}$, que parece ser un punto bastante conflictivo en cuanto a la gran cantidad de reflexiones que hacen caer la potencia hasta tal punto que queda unos 13dBm por debajo de la radial de $d=40\text{m}$. En cualquier caso sigue superando la condición de la sensibilidad mínima.

4.5.3. Escenario 3

Por otro lado, pensando en un tipo de comunicación bidireccional, el tercer y último escenario será igual que el anterior, con la salvedad de que ahora el transmisor se posicionará en la boya, concretamente en $(43.75, 10, 1.9)$.

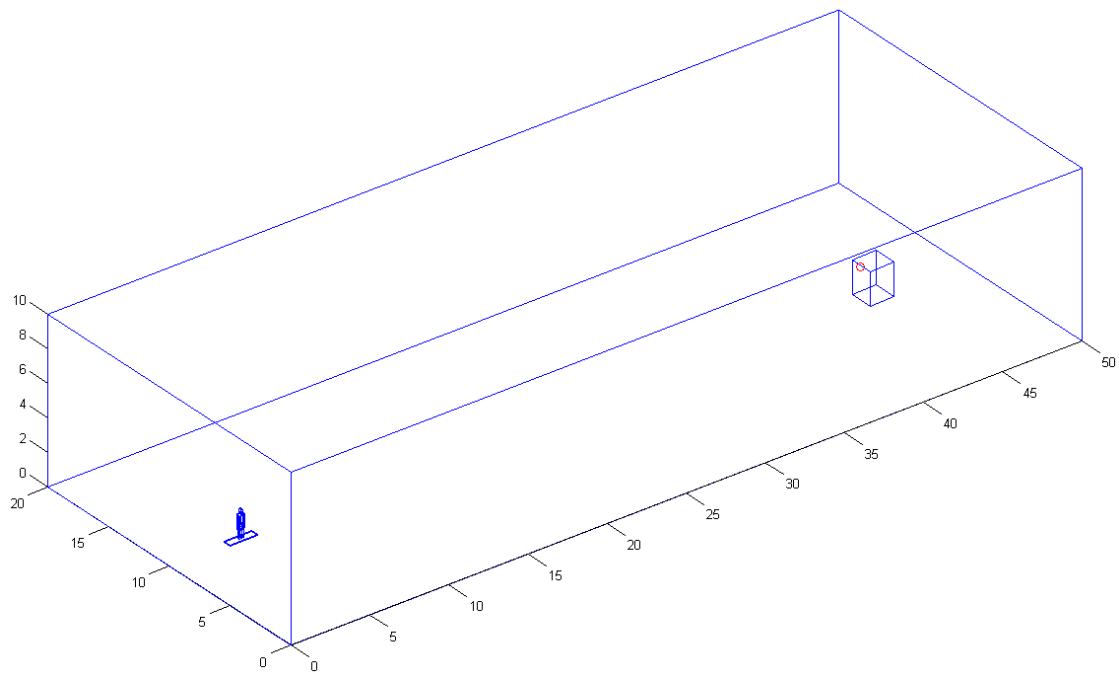
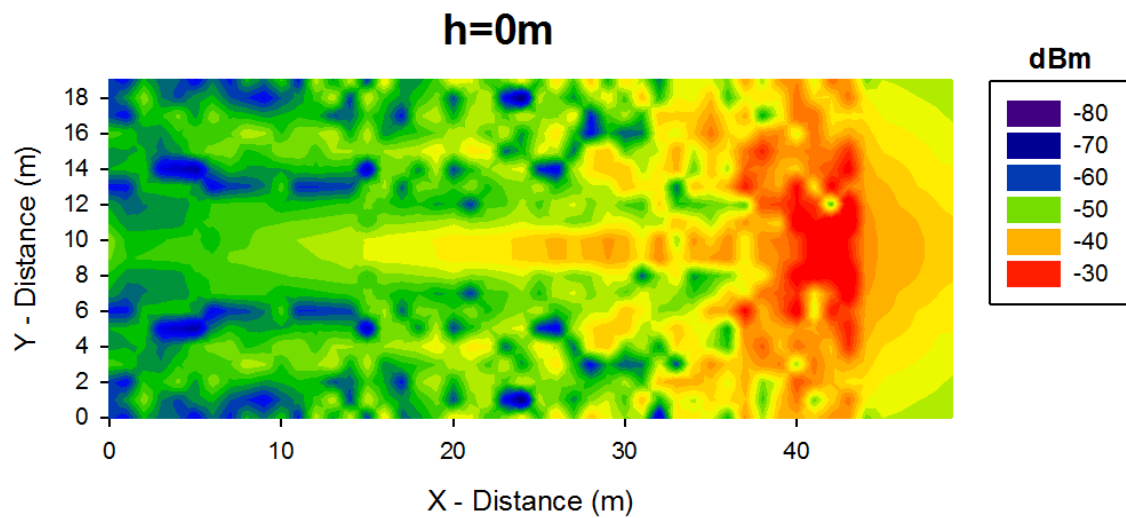
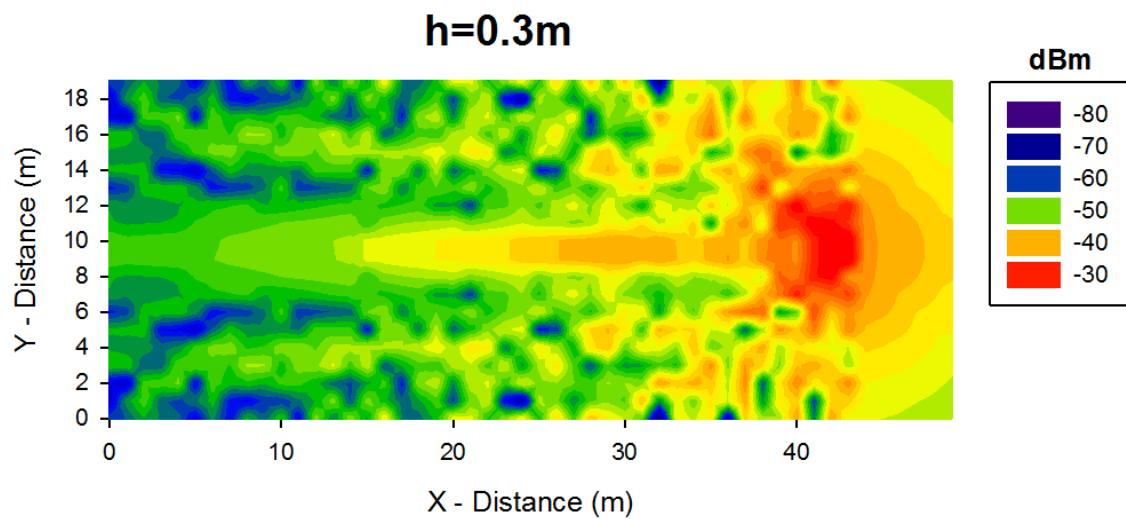
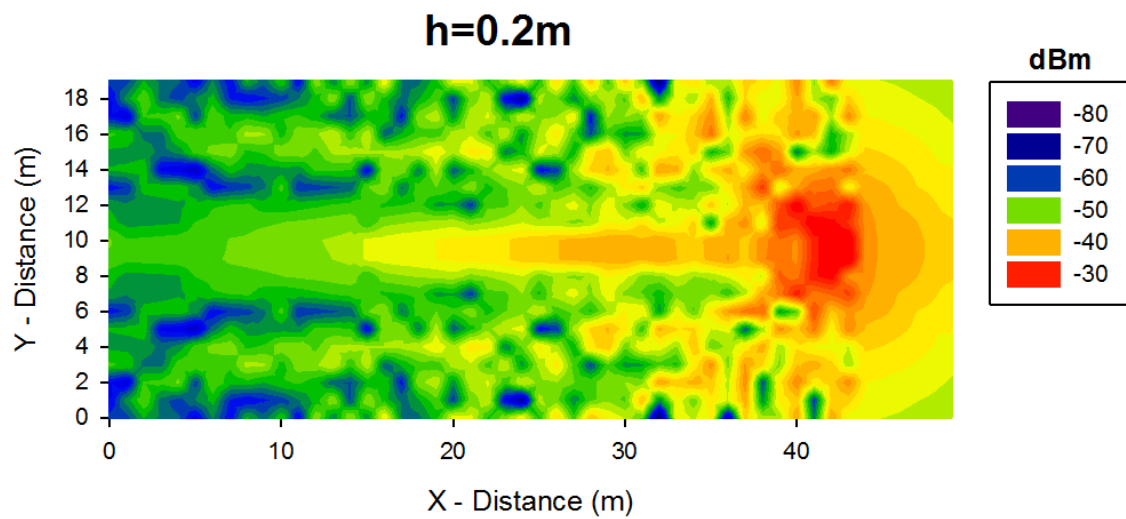
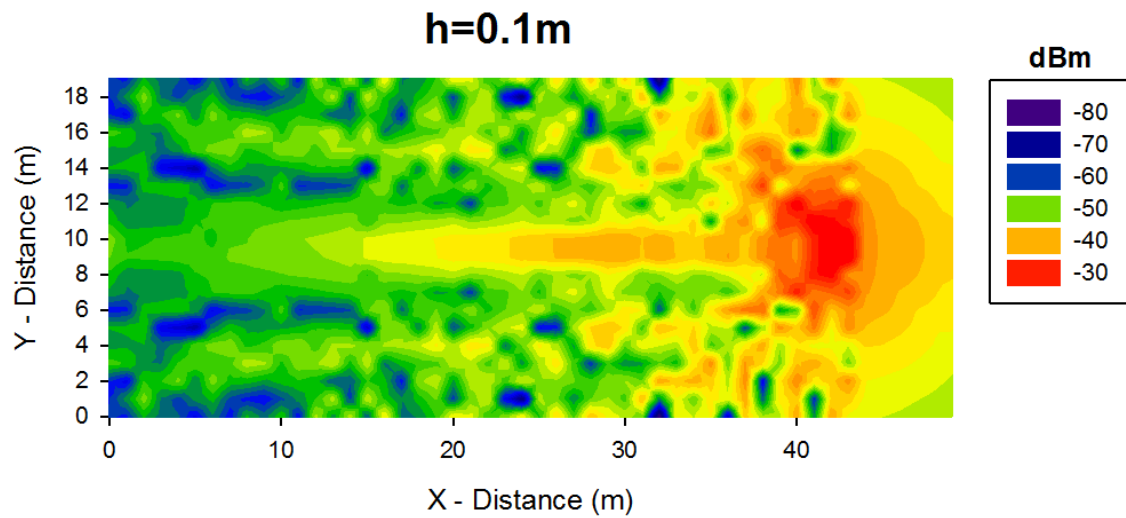


Fig. 4.17. Tercer escenario de simulación.

A continuación se muestran los planos bidimensionales con la distribución de potencia a una altura de 1m y después se presentarán las radiales de potencia Tx-Rx para los mismos tipos de rugosidad que en el escenario 1.





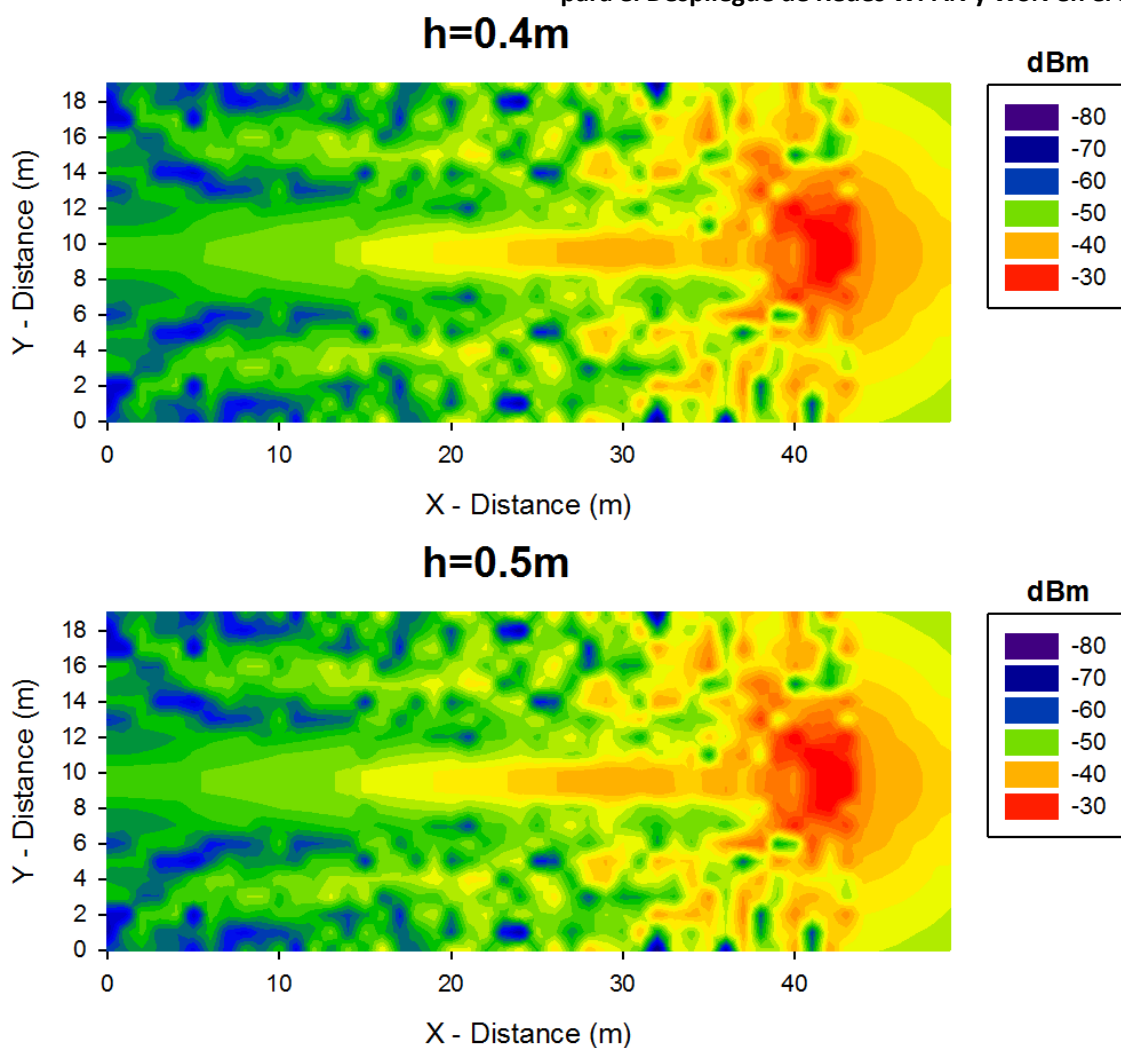


Fig. 4.18. Mapas de cobertura a una altura de 1m variando la altura de las olas cada 10cm.

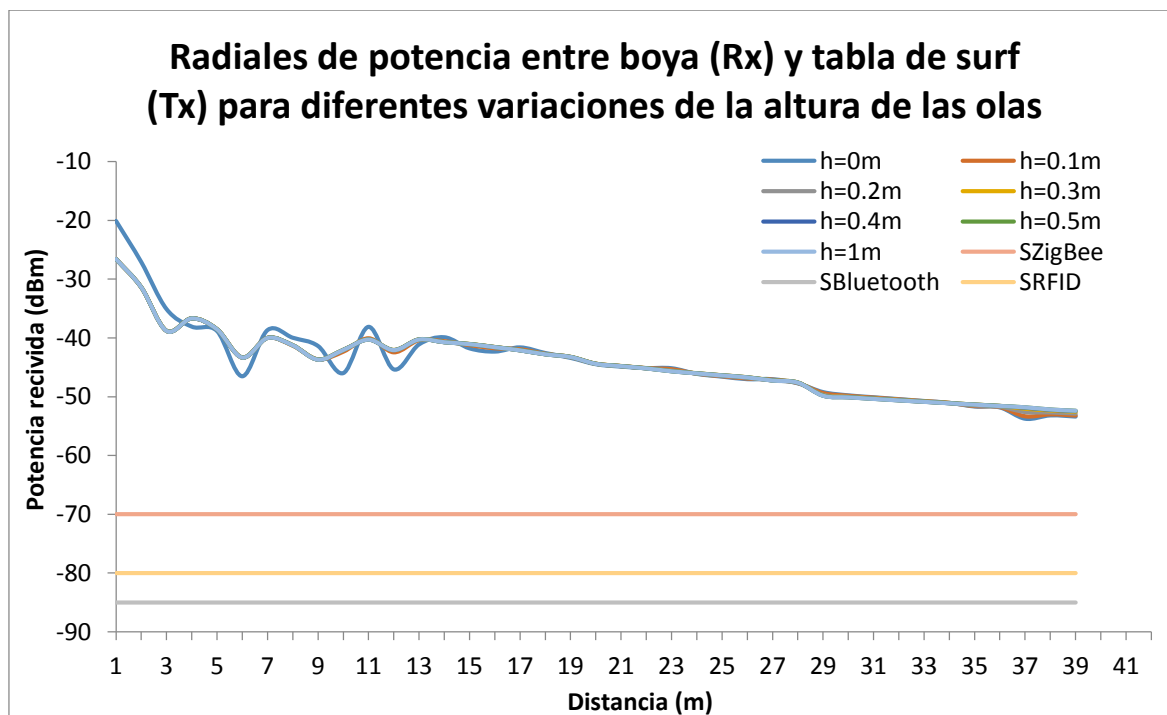


Fig. 4.19. Radiales de potencia variando la altura de las olas, y las sensibilidades de referencia.

En los resultados se observa, que al variar la rugosidad de la superficie, la distribución espacial de potencia apenas cambia. Además se puede ver en las radiales que la potencia va cayendo progresivamente, sin sufrir altibajos como en los escenarios de antes. Esto se debe a que, al colocar el transmisor en una posición más elevada, la influencia de las componentes multipath en el radioenlace es mínima, lo que da lugar a que la atenuación de la señal se produzca básicamente por las pérdidas de propagación en espacio libre. Evidentemente, en la potencia en el receptor será mayor que en los casos anteriores y superará con creces el valor de las sensibilidades.

4.6. Pérdidas por difracción

Para completar el trabajo y como primera aproximación, se va a estudiar de un modo analítico en qué medida puede afectar al radioenlace la presencia de obstáculos, tales como las propias olas del mar, situados en mitad del trayecto entre transmisor y receptor. Esto se resolverá teniendo en cuenta la recomendación ITU-R P.526-11 [38] y suponiendo un único obstáculo (ola).

Si consideramos el escenario 1, antes que nada habrá que calcular la primera región de Fresnel. Siendo d_1 y d_2 la distancia del transmisor y receptor al punto medio, respectivamente, el radio máximo de la primera zona de Fresnel, R_1 , vendrá dado por:

$$R_1 = \sqrt{\lambda \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}} = \sqrt{0.125 \frac{21.5 \cdot 21.5}{21.5 + 21.5}} = 1.159m$$

Según la recomendación ITU, con un despejamiento inferior al 60% de la primera zona de Fresnel las pérdidas por difracción empiezan a ser considerables.

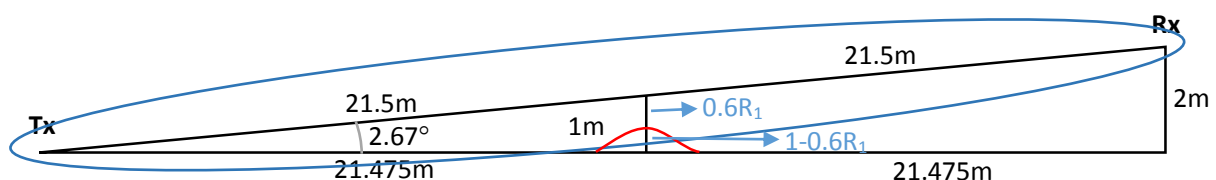


Fig. 4.20. Representación de la primera región de Fresnel.

Con un ángulo de elevación del primer vano tan pequeño, a esas distancias se supondrá que no existe diferencia de alturas entre transmisor y receptor para facilitar los cálculos y sabiendo que el error que se va a cometer será mínimo.

Así pues, tenemos que cuando una ola localizada en mitad del camino supera los 30cm de altura, se debe empezar a tomar en cuenta las pérdidas por difracción. Ahora estimaremos aproximadamente cuanto pueden ser esas pérdidas y cómo afectará al sistema.

Con este objetivo se aproximará la ola del mar como si fuera un obstáculo aislado en arista en filo de cuchillo (Fig. 4.21) para lo que se utilizarán las ecuaciones dadas en el apartado 4.1 de la recomendación ITU-R P526.11.

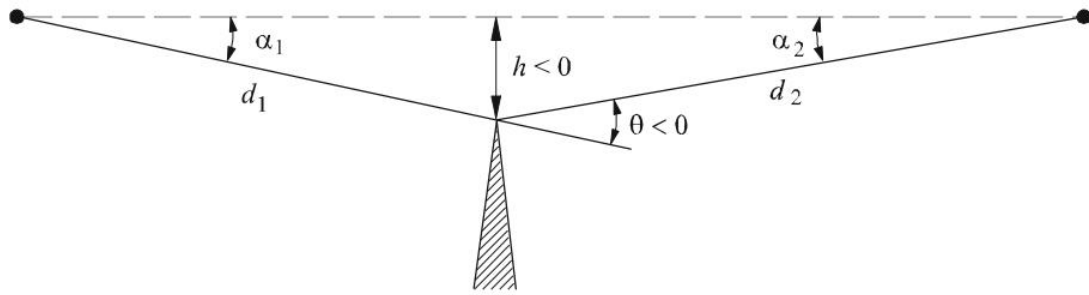


Fig. 4.21. Aproximación de obstáculo aislado en arista en filo de cuchillo [38].

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

Para valores de $v > -0.78$ las pérdidas se pueden aproximar mediante la siguiente expresión:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) [dB]$$

Si se hacen los cálculos para diferentes alturas de las olas del mar se puede obtener que:

$$\begin{aligned} h = -0.7m &\Rightarrow v = -0.615 \Rightarrow J(v = -0.615) = 1.13dB \\ h = -0.6m &\Rightarrow v = -0.527 \Rightarrow J(v = -0.527) = 1.76dB \\ h = -0.5m &\Rightarrow v = -0.439 \Rightarrow J(v = -0.439) = 2.42dB \\ h = 0m &\Rightarrow v = 0 \Rightarrow J(v = 0) = 6.03dB \end{aligned}$$

Considerando los resultados obtenidos en el escenario 1 y aplicando los obtenidos analíticamente en este apartado, la tabla 4.2 resume el efecto de la obstrucción por obstáculo:

Grado de rugosidad	Ldifracción (dB)	PRx (dBm)	SzigBee, SBluetooth, SRFID (dBm)
$\sigma_h=0.3m$	1.13	-62.77	> -70, -85, -80
$\sigma_h=0.4m$	1.76	-63.24	> -70, -85, -80
$\sigma_h=0.5m$	2.42	-63.81	> -70, -85, -80
$\sigma_h=1m$	6.03	-67.37	> -70, -85, -80

Tabla 4.2. Influencia de las pérdidas de difracción por obstrucción.

Al final, con este pequeño estudio, muy aproximado y en el que sería interesante profundizar un poco más, nos hemos podido hacer una idea del nivel de afección de la difracción que producen las olas del mar sobre el radioenlace, y se ha podido comprobar que, al disponer de un margen de seguridad tan amplio, el sistema puede soportar este fenómeno sin mayor problema, mientras el obstáculo no oculte casi toda la primera zona de Fresnel, en cuyo caso se producirá un desvanecimiento.

5. CONCLUSIONES

Partiendo de un estudio previo sobre la posibilidad de implementar una red WBAN entre una persona y una tabla de surf, en este trabajo se ha pretendido profundizar un poco más y ofrecer una nueva alternativa consistente en el establecimiento de un sistema de comunicaciones inalámbrico entre el propio surfista y elementos más alejados como una boya, con la finalidad de poder desplegar redes WPAN y WSN cuyas aplicaciones pueden ser muy numerosas y tener bastante repercusión.

En una primera parte del trabajo se ha hecho una investigación detallada sobre el estado del arte durante la cual, se ha comprobado la complejidad del canal radioeléctrico y los diferentes fenómenos que pueden interactuar en todo el entorno, se han analizado las propiedades y características de las tecnologías inalámbricas más típicas en la implantación de redes de área personal (WPAN) y corporal (WBAN), y se han estudiado algunos de los escasos trabajos que existen relacionados con la materia.

En la segunda parte del trabajo se ha realizado una caracterización completa de un sistema de comunicaciones inalámbrico entre un surfista y una boya. Partiendo del estudio, mediante un modelo de propagación FDTD, de la evolución del campo eléctrico en las cercanías del transceptor y una tabla de surf real, se ha extendido el análisis a un entorno exterior complejo más amplio, en el que se han introducido elementos como la persona, la boya o el agua, y utilizando una técnica de trazado de rayos, por un lado, y a través de cálculos numéricos, por el otro, se ha observado la influencia de fenómenos complejos como la dispersión difusa debida a la rugosidad de la superficie acuática y la difracción producida por las olas del mar situadas en mitad del trayecto entre emisor y receptor. También se ha comprobado cómo afecta la distancia de separación del enlace y el hecho de poner el transmisor en la boya para una posible comunicación bidireccional.

Con todo ello se ha demostrado la validez de un radioenlace de estas características y el buen funcionamiento incluso en unas condiciones tan exigentes como las del entorno que rodea al surf y a cualquier aplicación acuática.

6. LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se enumerarán las futuras líneas de trabajo que sería de gran interés llevar a cabo:

- Realizar pruebas empíricas con dispositivos comerciales.
- Realizar medidas experimentales en un entorno acuático real.
- Realizar un análisis más exhaustivo de la difracción por obstrucción.
- Analizar el comportamiento del sistema teniendo en cuenta unas condiciones climatológicas adversas.
- Extender el análisis incorporando más boyas, un grupo de surfistas, etc., y modelando, por ejemplo, un radioenlace entre surfistas.
- Estudiar la implantación de otro tipo de aplicaciones distintas, ya sean deportivas o no, con un contexto similar.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Recomendación UIT-R P.527-3, "Características eléctricas de la superficie de la tierra," 2000.
- [2] F. D. Hastings, J. B. Schneider, S. L. Broschat and E. I. Thorsos, "An FDTD Method for Analysis of Scattering from Rough Fluid–Fluid Interfaces," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 1, Jan. 2001.
- [3] J. C. West and Z. Zhao, "Electromagnetic Modeling of Multipath Scattering From Breaking Water Waves With Rough Faces," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 40, No. 3, pp. 583-592, Mar. 2002.
- [4] M. A. Aziz, S. C. Reising, W. E. Asher, L. Allen Rose, P. W. Gaiser and K. A. Horgan, "Effects of Air–Sea Interaction Parameters on Ocean Surface Microwave Emission at 10 and 37 GHz," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 43, No. 8, pp. 1763-1774, Aug. 2005.
- [5] M. Zhu, X. Zhao and Y. Zhang, "Study on a Sea Radio-wave Propagation Loss Model," in *Proc. of The International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2010.
- [6] C. Pérez, J. M. Zamanillo y A. Casanueva, "Sistemas de Telecomunicación," Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007.
- [7] A. Cardama, L. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu, S. Blanch y M. Ferrando, "Antenas," Ediciones UPC, 2002.
- [8] K. Yang, A. F. Molisch, T. Ekman, and T. Røste, "A Deterministic Round Earth Loss Model for Open-Sea Radio Propagation," in *Proc. of the 77th IEEE VTC Spring*, Dresden, Germany, 2013.
- [9] www.bluetooth.org.
- [10] IEEE Standard for Information technology, IEEE Std 802.15.1, 2002.
- [11] www.zigbee.org.
- [12] IEEE Standard for Information technology, IEEE Std 802.15.4, 2006.
- [13] www.digi.com.
- [14] www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/radio/rfid.
- [15] J. I. Portillo, A. B. Bermejo, A. Bernardos, J. R. Casar e I. Martínez, "Tecnologías RFID: Aplicaciones en el Ámbito de la Salud," CEDITEC – UPM, Madrid, 2007.
- [16] www.gs1.org/epcglobal.
- [17] www.motorolasolutions.com.
- [18] www.intermec.es.
- [19] www.zebra.com.
- [20] www.iso.org.
- [21] www.rfidjournal.com.
- [22] www.nfc-forum.org.
- [23] www.ecma-international.org.
- [24] www.nfcon.es.
- [25] www.nfcworld.com.
- [26] H. H. Chen, M. Guizani, "Next Generation Wireless Systems and Networks", John Wiley, 2006.

- [27] M. Jiang, Z. Guo, F. Hong, Y. Ma and H. Luo, "OceanSense: A Practical Wireless Sensor Network on the Surface of the Sea" *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2009.
- [28] S. Sendra, J. V. Lamparero, J. Lloret and M. Ardid, "Underwater Communications in Wireless Sensor Networks using WLAN at 2.4 GHz" *8th IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, 2011.
- [29] S. Sendra, J. Lloret, J. J. P. C. Rodrigues and J. M. Aguiar, "Underwater Wireless Communications in Freshwater at 2.4 GHz", *IEEE Communications Letters*, Vol. 17, No. 9, pp. 1794-1797, September 2013.
- [30] A. A. Abdou, A. Shaw, A. Mason, A. Al-Shamma'a, J. Cullen and S. Wylie, "Electromagnetic (EM) wave propagation for the development of an Underwater Wireless Sensor Network (WSN)", *IEEE Sensors*, pp. 1571-1574, 2011.
- [31] D. A. James, A. Galehar and D. V. Thiel, "Mobile sensor communications in aquatic environments for sporting applications" in *8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA)*, 2010.
- [32] M. Gong, L. Zhang, Z. Ding, F. Dong and L. Wang, "Research and Development of Swimming Training Information System Based on ZigBee Technology" in *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012)*, 2012.
- [33] www.tecnalia.com.
- [34] D. Dezan de Bona, G. S. Ferreira and L. Schwarz, "Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surfe utilizando Tecnologia ZigBee" in *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON'10)*, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [35] D. Dezan de Bona, M. A. Marques and M. V. Correia, "Instrumentation of a Surfboard to Evaluate Surfing Performance," in *11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*, Porto, Portugal, 2014.
- [36] Hartmut Dr Zimmermann and Ilja Dr Rueckmann, "Movement Parameter Recording Device for Surfing," *DE 19718917 C1*, 1999.
- [37] Salvador Francisco Tirloni and Avelino Arantes Bastos, "Surfing Parameters Gauge and Transfer Apparatus," *US 7166005 B2*, 2007.
- [38] Recomendación UIT-R P.526-11, "Propagación por difracción," 2009.

8. ANEXOS

8.1. Código RL-3D

En este anexo se presenta parte del código utilizado durante el desarrollo del trabajo. Concretamente se puede ver, un caso de la función donde se define el escenario de simulación, y la función que calcula los rayos reflejados y transmitidos en la que se debe especificar el tipo de rugosidad a considerar.

8.1.1. creaescenarioTablaPersonaDepie.m

```
function
[room,conexiones,antenastx,antenasrx,rebotessedentrodeobstaculo,guardoparam
etrosdentroobstaculos,difraccion]=
crearescenarioTablaPersonaDepie(f,Xant,Yant,Zant,phii,Aphi,phif,tethai,At
heta,thetaf)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%                HABITACION 1                %%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a1=50; %largo en x
b1=20; %ancho en y
c1=10; %alto en z
Resx1=ceil(a1/1); %resoluciones
Resy1=ceil(b1/1);
Resz1=ceil(c1/1);
m1=0; %material interior

personalroom1=fabricapersona(4.5,2.5,0.045/2+(0.045/2),1.68,1,2,0,0);
tabla= [4.5,2.5,0.045/2,1.75,0.46,0.045,47];
boya=fabricapared(50-4.5,20-2.5,1,1.5,1.5,2,6);

pintaobstaculo(a1,b1,c1,personalroom1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,tabla);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,boya);

axis([0 a1 0 b1 0 c1])
% obstaculos = [x,y,z,Ax,Ay,Az,material]

%hold on
%title('habitacion 1')
%figure

obstaculos1=[tabla;personalroom1;boya];

paredes1=[0,b1/2,c1/2,10^-9,b1,c1,0,0.08; %pared aire
          a1/2,b1,c1/2,a1,10^-9,c1,0,0.08; %pared aire
          a1,b1/2,c1/2,10^-9,b1,c1,0,0.08; %pared aire
          a1/2,0,c1/2,a1,10^-9,c1,0,0.08; %pared aire
```

```

a1/2,b1/2,0,a1,b1,10^-9,50,0.3; %suelo agua
a1/2,b1/2,c1,a1,b1,10^-9,0,0.3]; %techo aire

pintaobstaculo(a1,b1,c1,paredes1);

% paredes = [x,y,z,Ax,Ay,Az,material,grosor]

% material0 : aire
% material1 : madera
% material2 : pared ladrillo
% material3 : pared pladur
% material4 : puertas
% material5 : cristal
% material6 : aluminio
% material7 : hormigon

room1=prepararhabitacion(a1,b1,c1,Resx1,Resy1,Resz1,m1,obstaculos1,paredes1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONEXIONES %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

room=cell(1,1); %cell{1,3} si hay tres habitaciones
room{1}=room1;
%room{2}=room2;
%room{3}=room3;

conexiones=zeros(1,14);

% CONEXIONES
[numerohabitacion,x0,y0,z0,Ax,Ay,Az,numerootrahabitacion,.....]
% da las coordenadas relativas de la conexion y tal

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ANTENAS TX Y RX %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

antenastx=[1,Xant,Yant,Zant,phii,Aphi,phif,tethai,Atheta,thetaf,6,inf,1,0,0,0,0,0,0,2400000000,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]; %ojo que teta solo va de 0 a pi como max
plot3(4.5-(1.75/2)+0.11,2.5,0.045+0.05,'or'); % primer pto del tx
% plot3(3.01,2.75,0.9,'or'); % segundo pto del tx
% plot3(1.81,0.41,0.9,'or'); % tercer pto del tx
% plot3(4.41,2.61,0.9,'or'); %cuarto pto del tx
% plot3(0.4,3.5,0.9,'or'); %rx

%numeroderayos=length(antenastx(5):antenastx(6):antenastx(7))*length(antenastx(8):antenastx(9):antenastx(10)) %numero de rayos
% antenatx [ numerohabitacion, x,y,z,phii,Aphi,phif,tethai,Atheta,thetaf,nrebotes,taumaxima,numerodeantena,esficticiaporrefraccion,thetao,phio,tau0,reflexion0, frecuencia] 20 movidas

```

```

antenasrx=zeros(1,8); %no pones antena tx y luego ves lo que captaría si
pusiesemos omnidireccionales en todos los cubos a la hora de sacar
parámetros
rebotesdentrodeobstaculo=0;
guardoparámetrosdentroobstaculos=0;
difraccion=1;
%antenasrx=[1,6,5.1,1,0,2*pi,0,2*pi];
%plot3(6,5.1,1,'xr');
%antenasrx=[3,0.2,4,2.9,0,2*pi,0,pi;1,2.5,2.5,0.95,0,2*pi,0,pi;1,6.5,3.3,
0.3,0,2*pi,0,pi;2,5.5,2.5,0.95,0,2*pi,0,pi;2,2.5,3.3,0.3,0,2*pi,0,pi;];

```

8.1.2. refraccionobjetosuperficierrugosa.m

```

function movidasvarias =
refraccionobjetosuperficierrugosa(x1,y1,z1,objeto,m1,theta1,phi1,f)

%
movidasvarias=[x2,y2,z2,theta2,phi2,t2,reflexionr(VyH),refraccionr(VyH),d
istanicia,rebotes]
% if m1 ~= 0
%
%
% paredizquierda=(abs(x1-(objeto(1)+objeto(4)/2))<10^-9);
% paredderecha=(abs(x1-(objeto(1)-objeto(4)/2))<10^-9);
% paredfrontal=(abs(y1-(objeto(2)+objeto(5)/2))<10^-9);
% paredtrasera=(abs(y1-(objeto(2)-objeto(5)/2))<10^-9);
% paredtecho=(abs(z1-(objeto(3)+objeto(6)/2))<10^-9);
% paredsuelo=(abs(z1-(objeto(3)-objeto(6)/2))<10^-9);
%
% else

h=0.3; %variación de la altura de la superficie rugosa

paredderecha=(abs(x1-(objeto(1)+objeto(4)/2))<0.01);
paredizquierda=(abs(x1-(objeto(1)-objeto(4)/2))<0.01);
paredfrontal=(abs(y1-(objeto(2)+objeto(5)/2))<0.01);
paredtrasera=(abs(y1-(objeto(2)-objeto(5)/2))<0.01);
paredtecho=(abs(z1-(objeto(3)+objeto(6)/2))<0.01);
paredsuelo=(abs(z1-(objeto(3)-objeto(6)/2))<0.01);

% end

[n2,alfa2,betamaterial2,conductivity]=parametromaterial(objeto(1,7),f);
[n1,alfa1,betamaterial1,conductivity]=parametromaterial(m1,f);
mu1=120*pi/n1;
mu2=120*pi/n2;
beta1=0; %inicializa a 0 para que no de errores
beta2=0; %inicializa a 0 para que no de errores

% Visto desde fuera es al reves que desde dentro, izquierda derecha,
arriba abajo xD

hayrefraccion=1;

```

```

if
(paredderecha+paredizquierda+paredfrontal+paredtrasera+paredtecho+paresu
elo) > 1

    hayrefraccion=0; %ha caido en aristas

elseif (paresuolo) & (thetal < pi/2)
    betal=thetal;
    if betal==0
        beta2=0;
    else
        beta2=asin((n1/n2)*sin(betal));
    end
    theta2=beta2;
    phi2=phi1;

elseif paredtecho & (thetal > pi/2)
    betal=pi-thetal;

    if betal==0
        beta2=0;
    else
        beta2=asin((n1/n2)*sin(betal));
    end

    theta2=beta2+pi/2;
    phi2=phi1;

elseif paredizquierda & ( ((phi1>=0) & (phi1<=pi/2)) | ((phi1>=3*pi/2) &
(phi1<=2*pi)) )

    if (phi1>=0) & (phi1<=pi/2)
        if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
            thetalprima=pi/2-thetal;
            phi1prima=phi1;

            [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles(thetalprima,phi1prima,n1,n2);

            theta2=pi/2-theta2prima;
            phi2=phi2prima;

        elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
            thetalprima=thetal-pi/2;
            phi1prima=phi1;

            [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles(thetalprima,phi1prima,n1,n2);

            theta2=pi/2+theta2prima;
            phi2=phi2prima;
        end

    elseif (phi1>=3*pi/2) & (phi1<=2*pi)
        if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
            thetalprima=pi/2-thetal;

```

```

        philprima=2*pi-phil;

        [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2-theta2prima;
        phi2=2*pi-phi2prima;

        elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
            thetalprima=thetal-pi/2;
            philprima=2*pi-phil;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2+theta2prima;
            phi2=2*pi-phi2prima;
        end
    end

elseif paredderecha & ( ((phil>=pi/2) & (phil<=pi)) | ((phil>=pi) &
(phil<=3*pi/2)) )
    if (phil>=pi/2) & (phil<=pi)
        if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
            thetalprima=pi/2-thetal;
            philprima=pi-phil;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2-theta2prima;
            phi2=pi-phi2prima;

            elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
                thetalprima=thetal-pi/2;
                philprima=pi-phil;

                [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

                theta2=pi/2+theta2prima;
                phi2=pi-phi2prima;
            end

            elseif (phil>=pi) & (phil<=3*pi/2)
                if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
                    thetalprima=pi/2-thetal;
                    philprima=phil-pi;

                    [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

                    theta2=pi/2-theta2prima;
                    phi2=pi+phi2prima;

                    elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
                        thetalprima=thetal-pi/2;
                        philprima=phil-pi;

```



```

        [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2+theta2prima;
        phi2=pi+phi2prima;
    end
end

elseif paredtraseira & ( ((phil>=0) & (phil<=pi/2)) | ((phil>=pi/2) &
(phil<=pi)) )
    if (phil>=0) & (phil<=pi/2)
        if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
            thetalprima=pi/2-thetal;
            philprima=pi/2-phil;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2-theta2prima;
            phi2=pi/2-phi2prima;

        elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
            thetalprima=thetal-pi/2;
            philprima=pi/2-phil;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2+theta2prima;
            phi2=pi/2-phi2prima;
        end

    elseif (phil>=pi/2) & (phil<=pi)
        if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
            thetalprima=pi/2-thetal;
            philprima=phil-pi/2;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2-theta2prima;
            phi2=pi/2+phi2prima;

        elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
            thetalprima=thetal-pi/2;
            philprima=phil-pi/2;

            [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

            theta2=pi/2+theta2prima;
            phi2=pi/2+phi2prima;
        end
    end

elseif paredfrontal & ( ((phil>=pi) & (phil<=3*pi/2)) | ((phil>=3*pi/2) &
(phil<=2*pi)) )

```

```

if (phil>=pi) & (phil<=3*pi/2)
    if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
        thetalprima=pi/2-thetal;
        philprima=3*pi/2-phil;

        [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2-theta2prima;
        phi2=3*pi/2-phi2prima;

    elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
        thetalprima=thetal-pi/2;
        philprima=3*pi/2-phil;

        [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2+theta2prima;
        phi2=3*pi/2-phi2prima;
    end

elseif (phil>=3*pi/2) & (phil<=2*pi)
    if (thetal>=0) & (thetal<=pi/2)
        thetalprima=pi/2-thetal;
        philprima=phil-3*pi/2;

        [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2-theta2prima;
        phi2=3*pi/2+phi2prima;

    elseif (thetal>pi/2) & (thetal<=pi)
        thetalprima=thetal-pi/2;
        philprima=phil-3*pi/2;

        [theta2prima,phi2prima,betal,beta2] =
newangles (thetalprima,philprima,n1,n2);

        theta2=pi/2+theta2prima;
        phi2=3*pi/2+phi2prima;
    end
end

else
    hayrefraccion=0;

end

%si ha habido reflexión total
if imag(beta2) ~=0
% if n2 > 1000
    reflexionH=exp(-2*((2*pi*f/(3*10^8))*h*sin(pi/2-beta1))^2);
    reflexionV=exp(-2*((2*pi*f/(3*10^8))*h*sin(pi/2-beta1))^2);
    refraccionH=0;
    refraccionV=0;
    reflexionr=[reflexionV,reflexionH];

```

```

    refraccionr=[refraccionV,refraccionH];
%     hayrefraccion=0;

else
    reflexionH=((mul*cos(beta1)-
mu2*cos(beta2))/(mul*cos(beta1)+mu2*cos(beta2)))*exp(-
2*((2*pi*f/(3*10^8))*h*sin(pi/2-beta1))^2);
    reflexionV=((mu2*cos(beta1)-
mul*cos(beta2))/(mu2*cos(beta1)+mul*cos(beta2)))*exp(-
2*((2*pi*f/(3*10^8))*h*sin(pi/2-beta1))^2);
    refraccionH=2*mu2*cos(beta1)/(mul*cos(beta1)+mu2*cos(beta2));
    refraccionV=2*mu2*cos(beta1)/(mu2*cos(beta1)+mul*cos(beta2));
    reflexionr=[reflexionV,reflexionH];
    refraccionr=[refraccionV,refraccionH];
end

if hayrefraccion
    %reutilizas la función para calcular el punto de impacto de salida
    del
    %objeto, es como si fuese una habitacion del tamaño del objeto
    rayo=rayopared(objeto(4),objeto(5),objeto(6),abs(x1-(objeto(1)-
objeto(4)/2)),abs(y1-(objeto(2)-objeto(5)/2)),abs(z1-(objeto(3)-
objeto(6)/2)),theta2,phi2,n2);

% rayo=[xr,yr,zr,tetar,phir,tr];
    refraccionantenvirtual1=refraccionr;

    x2=rayo(1)+(objeto(1)-objeto(4)/2);
    y2=rayo(2)+(objeto(2)-objeto(5)/2);
    z2=rayo(3)+(objeto(3)-objeto(6)/2);

    distancia=sqrt((x1-x2)^2+(y1-y2)^2+(z1-z2)^2);
    t2=distancia/(2*pi*f/betamaterial2);
    perdidasE = exp(-alfa2*distancia);
    refraccionr=refraccionr*perdidasE;

    %rebotes=1;

    movidasvarias=[x2,y2,z2,theta2,phi2,t2,reflexionr,refraccionr,distancia,r
efraccionantenvirtual1];

else

    movidasvarias=[0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0]; %matar el rayo refractado
    rayosmatados=1;
end

function rayo = rayopared(a,b,c,x0,y0,z0,teta,phi,n) %calcula el punto de
impacto y todas las movidas de choque con una habitacion vacia de objetos

% Esta funcion nos da el punto de rebote, y los nuevos angulos teta y phi
de la onda rebotada, si le damos como entrada las dimensiones, y la
localizacion de la fuente y la direccion de propagacion
% rayo=[xr,yr,zr,tetar,phir,tr];
Vp=3*10^8/n;
Vx=real(Vp*sin(teta)*cos(phi));
Vy=real(Vp*sin(teta)*sin(phi));

```

```

Vz=Vp*cos (teta) ;

if Vx>0
    tx=(a-x0)/Vx;

elseif Vx<0
    tx=-x0/Vx;

else %Vx==0
    tx=inf;
end

if Vy>0
    ty=(b-y0)/Vy;

elseif Vy<0
    ty=-y0/Vy;

else %Vy==0
    ty=inf;
end

if Vz>0
    tz=(c-z0)/Vz;

elseif Vz<0
    tz=-z0/Vz;

else %Vz==0
    tz=inf;
end

tr=min([tx,ty,tz]);
xr=x0+Vx*tr;
yr=y0+Vy*tr;
zr=z0+Vz*tr;

%%%% angulos nuevos, falta calcular en la esquinas %%%%

if (tr==tx) & (tr~=ty) & (tr~=tz)
    if (phi>=0 && phi<=pi)
        phir=pi-phi;
    end
    if (phi>pi && phi<=2*pi+pi/180)
        phir=3*pi-phi;
    end
    tetar=teta;

elseif (tr~=tx) & (tr==ty) & (tr~=tz)
    phir=2*pi-phi;
    tetar=teta;

```

```

elseif (tr~=tx) & (tr~=ty) & (tr==tz)
    tetar=pi-teta;
    phir=phi;

elseif (tr==tx) & (tr==ty)
    if (phi>=0 && phi<=pi)
        phir=pi+phi;
    end
    if (phi>pi && phi<=2*pi+pi/180)
        phir=phi-pi;
    end
    if tr==tz
        tetar=pi-teta;
    else
        tetar=teta;
    end
end

rayo=[xr,yr,zr,tetar,phir,tr];

function [theta2prima,phi2prima,beta1,beta2] =
newangles(theta1prima,phi1prima,n1,n2)
beta1prima=asin(cos(theta1prima)*cos(phi1prima));
beta1=pi/2-beta1prima;
beta2=asin((n1/n2)*sin(beta1));
if phi1prima==0
    if theta1prima==0
        X=0;
    else
        X=pi/2;
    end
else
    X=atan(tan(theta1prima)/sin(phi1prima));
end
phi2prima=atan(tan(beta2)*cos(X));
theta2prima=asin(sin(beta2)*sin(X));

```

8.2. Herramientas utilizadas

En este anexo se enumeran todos los elementos utilizados durante la realización del proyecto. Se hablará en primer lugar del hardware empleado, donde se incluyen, tanto los equipos que se usaron para lanzar las simulaciones o procesar los datos obtenidos, como la instrumentación utilizada durante las medidas. Después se comentará brevemente el software utilizado.

8.2.1. Hardware

8.3.1.1. Estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20

Las principales características de este equipo son las siguientes:

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Fig. 8.1. Ordenador Lenovo ThinkStation D20.

8.3.1.2. Ordenador portátil Lenovo U410

Algunas de sus características son:

- Procesador Intel® Core™ i5-3317U de cuatro núcleos a 1,7GHz
- Memoria DDR3 de 8 GB a 1.600 MHz
- Tarjeta gráfica NVIDIA® GeForce® 610M de 1 GB
- Disco duro de 500 GB a 5400 rpm y unidad SSD de 32 GB



Fig. 8.2. Ordenador portátil Lenovo U410.

8.2.2. Software

8.2.2.1. Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa MathWorks.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación M ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas.

Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas de álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos gráficamente en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.

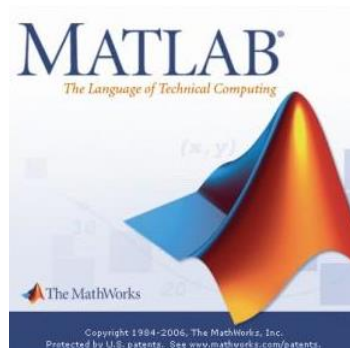


Fig. 8.3. Matlab de MathWorks.

8.2.2.2 CST Studio Suite

El software de simulación CST Studio Suite es una solución computacionalmente eficiente y precisa para diseño electromagnético. Las herramientas que contiene son capaces de diseñar y optimizar dispositivos que operan en un amplio rango de frecuencias. Los análisis también pueden incluir efectos térmicos y mecánicos, así como de simulación de circuitos.



Fig. 8.4. CST Studio Suite.

8.2.2.3. SigmaPlot

SigmaPlot es uno de los paquetes estadísticos más conocidos. A partir de una sencilla hoja de cálculo permite generar gráficas de alta calidad y efectuar análisis estadísticos complejos, de un modo rápido y sencillo.

SigmaPlot ha sido creado por la empresa SYSTAT® y cuenta con un gran reconocimiento a nivel mundial, además de haber sido premiado en varias ocasiones.

Sus principales características son:

- Gran flexibilidad.
- Compatibilidad con Microsoft Windows y Office.
- Más de 100 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Rápida representación gráfica desde plantillas.
- Posibilidad de combinación con las capacidades estadísticas de SPSS.
- Extensible a través de macros Visual Basic.
- Ayuda en línea.

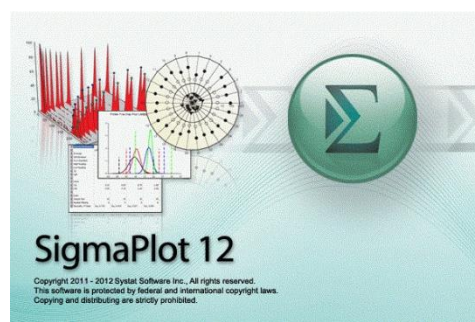


Fig. 8.5. SigmaPlot 12.

8.2.2.4. Microsoft Word & Excel

Microsoft Word es el procesador de textos más conocido hoy en día, ya sea desde una página en blanco, o usando alguna de las plantillas de las que dispone, éste programa

ayuda a crear, editar y enriquecer textos con una gran selección de herramientas y contenido complementario.

Las características más importantes de Microsoft Word son:

- Generar tablas y gráficas.
- Crear hipervínculos a páginas web.
- Insertar imágenes y capturas de pantalla.
- Exportar a PDF.
- Herramientas de corrección y traducción - Macros para automatizar tareas.



Fig. 8.6. Microsoft Word 2013.

Microsoft Excel es un software específico de hojas de cálculos que posee una interfaz práctica y funcional donde el usuario puede gestionar rápidamente su información y visualizar todos los datos de la mejor forma.

Las características más importantes de Microsoft Excel son:

- Rápida creación de tablas y gráficos.
- Gran cantidad de plantillas.
- Gráficos dinámicos y elegantes.
- Posibilidad de compartir documentos en línea.



Fig. 8.7. Microsoft Excel 2013.

9.4. Publicaciones

Las conclusiones de todo el trabajo realizado han dado lugar a varias publicaciones que se enumeran a continuación y que pueden verse al completo más abajo:

- H. Baghdadi, E. Aguirre, P. Lopez, L. Azpilicueta, J. J. Astrain, J. Villadangos and F. Falcone, "Analysis of Radiopropagation of Wireless Transceivers in Surfboards," *AP-S/URSI 2014*, Memphis, Tennessee, Estados Unidos. Publicado.
- H. Baghdadi, E. Aguirre, P. Lopez, L. Azpilicueta, J. J. Astrain, J. Villadangos and F. Falcone, "Caracterización Radioeléctrica en Entorno Acuático para Sistemas Inalámbricos Embebidos en Tablas de Surf," *URSI 2014*, Valencia, España. Publicado.
- H. Baghdadi, E. Aguirre, P. Lopez, L. Azpilicueta, J. J. Astrain, J. Villadangos and F. Falcone, "Characterization of UHF Radio Channels for Wireless Sensor Systems Embedded in Surfboards," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014. Enviado.

Analysis of Radiopropagation of Wireless Transceivers in Surfboards

Hisham Baghdadi⁽¹⁾, Erik Aguirre⁽¹⁾, Peio Lopez ⁽¹⁾, Leire Azpilicueta⁽¹⁾, José Javier Astráin⁽²⁾, Jesús Villadangos⁽²⁾, Francisco Falcone⁽¹⁾

(1) Dep. de Ing. Eléctrica y Electrónica, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

(2) Dep. de Ing. Matemática e Informática, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

The evolution of wireless technology and detection sensors allow the development of economical and wearable systems that can offer usable information like weather status or changes in person movements and their use can be interesting in some sports where the human body movements are crucial for the result of the competition. In surfing an accelerometer could provide information about all the movements of a contestant and transmit all the information using a wireless link, although the electromagnetic challenge of being surrounded by water must be considered. In this work this complexity is taken in account in order to determine the possible implementation of this kind of systems in this sport. Using a 3D ray launching method a surfboard including the presence of human body has been simulated for two scenarios, with water and with concrete under the board, in which the material properties of all materials have been considered. An antenna has been placed in the back side of the table emitting with an operation frequency of 2.4GHz and the results for the two scenarios are depicted in the Figure 1 using horizontal power level planes at 0.3m and 0.9m. As expected, lower power levels are received when the board is over water caused by the higher absorption of this material, but in two cases they are compatibles with the data transmission. In conclusion, a sensor system for taking and saving information about person movements or his vital signs that allows the downloading of the data once the activity is finished could be implemented in this kind of sports.

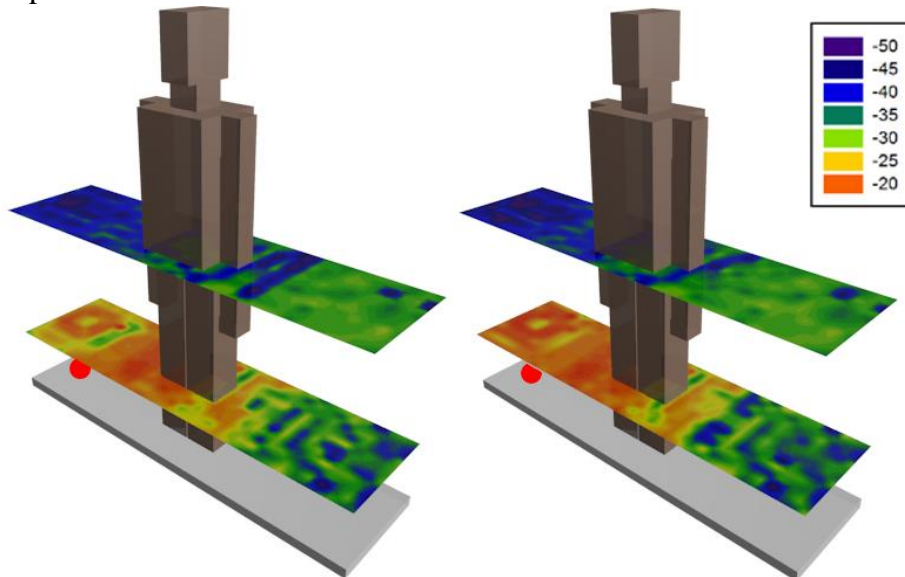


Figure 1 : Simulation results considering that surfboard is on water (Left) and on concrete(Right) with a emitting antenna in the back side(red point).

Caracterización Radioeléctrica en Entorno Acuático para Sistemas Inalámbricos Embebidos en Tablas de Surf

Hisham Baghdadi⁽¹⁾, Erik Aguirre⁽¹⁾, Peio Lopez⁽¹⁾, Leire Azpilicueta⁽¹⁾, José Javier Astráin⁽²⁾,
Jesús Villadangos⁽²⁾, Francisco Falcone⁽¹⁾

hisham286@hotmail.com, aguirrerik@gmail.com, peio.lopez@unavarra.es, leire.azpilicueta@unavarra.es,
josej.astrain@unavarra.es, jesusv@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es

⁽¹⁾ Dep. de Ing. Eléctrica y Electrónica, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

⁽²⁾ Dep. de Ing. Matemática e Informática, UPNA, Pamplona, Navarra, Spain

Abstract- In this paper, the behavior of wireless propagation in surf uses is presented. Due to the complexity of aquatic environment that is extremely troublesome for high frequency signals, a thorough radio channel characterization is necessary for the implementation and performance of wireless systems. Deterministic simulation results are shown using an in-house 3D ray launching code, clearly stating the topological and morphological dependence of the wireless link. This results are also compared with the empirical measures in order to validate the model used. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective new wireless solutions applied to water sports.

I. INTRODUCCIÓN

A pesar de haberse convertido en uno de los deportes acuáticos más practicados en todo el mundo, el surf mantiene un índice de implantación tecnológica muy bajo. Sendos sistemas de comunicación inalámbrica que están siendo implementados en otros ámbitos de la vida y en otros deportes podrían prestar un buen servicio también en este caso. Esta baja implantación es fundamentalmente debida a la complejidad del entorno en el que se desarrolla el deporte, donde no es trivial implementar un sistema electrónico ya que este puede ser dañado por el agua y donde además el sistema inalámbrico puede funcionar incorrectamente por la influencia del agua. Así pues, resulta imprescindible un estudio detallado del canal radioeléctrico que determine la problemática existente y caracterice el comportamiento del sistema de comunicaciones, con el objetivo de ser la base para el desarrollo de futuras aplicaciones en este ámbito.

Existen ejemplos de utilización de sistemas inalámbricos para entornos subacuáticos [1]-[3], redes de sensores a gran escala que envían información medioambiental desde alta mar [4] y redes de área personal aplicadas a la natación [5]-[6]. Sin embargo en lo que respecta al surf, únicamente se han conseguido integrar varios sensores en una tabla, capaces de medir la tensión mecánica sufrida por ésta durante la práctica deportiva mediante tecnología Zigbee [7].

Como ya se ha comentado previamente, el entorno que rodea a deportes como el surf entraña muchas dificultades para la propagación de señales electromagnéticas de alta frecuencia. Fenómenos como la absorción, la reflexión, la refracción, la dispersión o la difracción, además de las pérdidas de propagación en el espacio libre propias de cualquier radioenlace, o de las componentes multitrayecto

debidas a una combinación de las anteriores, afectan de forma notoria al enlace, disminuyendo así los niveles de potencia recibida y llegando a ocasionar en algunos casos desvanecimientos profundos [8]-[10].

En este trabajo se ha estimado la distribución de potencia radiada por un transmisor situado en una tabla de surf haciendo uso del método determinista de lanzamiento de rayos en 3D. Para este estudio se han considerado diferentes elementos y situaciones que serán explicados durante el texto. Asimismo, se presentan las medidas empíricas obtenidas en un escenario interior que demuestran la validez del modelo utilizado y dan una idea de las posibilidades existentes. El estudio se ha realizado para las bandas de frecuencia ISM 2.4GHz y 868MHz, muy comúnmente empleadas en redes inalámbricas de área personal y corporal por tecnologías como RFID, Bluetooth o Zigbee.

A partir de este estudio se pretende demostrar la viabilidad de un sistema de comunicaciones tabla-persona en el que a modo de ejemplo, unos sensores sean capaces de monitorizar los movimientos o las constantes vitales del surfista y guardarlos en la tabla para poder ser visualizados a posteriori.

Para lograr los objetivos propuestos, se ha estructurado este artículo en tres apartados claramente diferenciados. En el primero se explicará el algoritmo de lanzamiento de rayos en 3D, el escenario de simulación que se ha definido y los resultados obtenidos. En el segundo se mostrarán y analizarán los resultados de las medidas experimentales. Y en el tercero y último se hará una valoración general del trabajo a través de las conclusiones.

II. ALGORITMO DE LANZADO DE RAYOS EN 3D

El método determinista utilizado para simular el canal radioeléctrico está basado en técnicas de trazado de rayos, cuyo código ha sido implementado en Matlab por la Universidad Pública de Navarra. El procedimiento básico consiste en discretizar la onda electromagnética generada por la antena transmisora (Tx) convirtiéndola en un número finito de rayos que basándose en técnicas de óptica geométrica interactúan con los diferentes objetos definidos en el escenario. El volumen de la habitación se divide en cubos dando lugar a la resolución del escenario. Por lo tanto al número de puntos en los que serán obtenidos los valores de

potencia teniendo en cuenta los diferentes fenómenos de propagación (reflexión, refracción y difracción) a partir de las propiedades dieléctricas y de la geometría de cada material atravesado por el rayo. Por lo tanto, la potencia transmitida por cada una de las antenas colocadas en el escenario se convierte en un número finito de rayos que se lanzan en un ángulo sólido definido previamente. Los parámetros que se pueden definir en el algoritmo son la frecuencia de operación, el diagrama de radiación de las antenas, el número de reflexiones, la separación entre ángulos en los rayos lanzados y la dimensión de los cuboides en los que dividimos el escenario. Este código de simulación ha sido testado con anterioridad en otros trabajos donde se define un escenario interior [11] o se incorpora el modelo de cuerpo humano [12].

Dada la limitación del simulador que impide crear objetos con formas curvadas, la tabla de surf se ha modelado como un prisma rectangular de dimensiones similares a la utilizada en las medidas (1.75 x 0.46 x 0.045 metros), donde la antena transmisora se ha ubicado en el eje longitudinal central, a 0.11m del borde. El modelo de cuerpo humano incorporado también ha sido desarrollado en la Universidad Pública de Navarra. La Fig. 1 muestra el conjunto formado por la tabla y la persona que se ha usado en las simulaciones. Los parámetros configurados se pueden ver en la Tabla I.

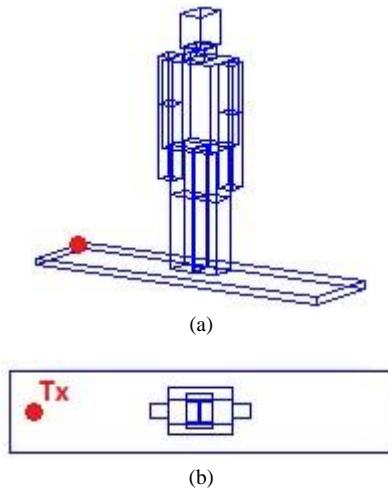


Fig. 1. Vista tridimensional (a) y vista aérea (b) del modelo simulado.

TABLA I
PARÁMETROS ALGORITMO LANZADO DE RAYOS EN 3D

Frecuencia	2.4GHz	868MHz
Potencia de transmisión	10dBm	
Ganancia de antena transmisora	0.82dBi	2dBi
Resolución angular plano horizontal ($\Delta\Phi$)	1°	
Resolución angular plano vertical ($\Delta\theta$)	1°	
Reflexiones	6	
Resolución de cuboides	5cm x 5cm x 5cm	

A. Escenario

El escenario representado en las simulaciones y donde se han realizado las correspondientes medidas es el laboratorio de antenas y microondas situado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pública de Navarra. Pese a ser un escenario interior, debido a su

amplitud (8 x 8 x 4 metros), la influencia en el estudio de los objetos que lo forman es despreciable, salvo el suelo de hormigón, que afectará de manera relevante a la señal electromagnética.

B. Resultados de simulación

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones electromagnéticas. Para ello, se han establecido dos planos bidimensionales a una altura de 0.3 y 0.9m sobre la tabla, los cuales determinan la variación espacial de la potencia recibida en dBm.

En primer lugar se puede comprobar la influencia de una persona en el canal radio, alternando dos posiciones habituales en esta modalidad deportiva, ya sea tumbada encima de la tabla (Fig. 2) o de pie (Fig. 3). También son visibles las diferencias entre las dos frecuencias de operación tratadas en este trabajo (2.4GHz y 868MHz).

En los mapas obtenidos se observa como caen los valores de potencia conforme se alejan del transmisor, y se evidencia lo influyente que puede resultar la presencia de un cuerpo humano en el entorno de un enlace de comunicaciones inalámbricas, más si cabe a mayores frecuencias.

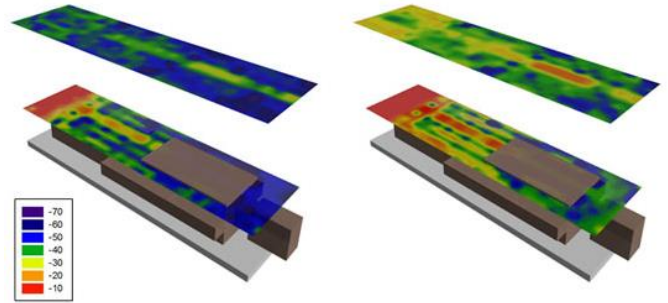


Fig. 2. Resultados de simulación con la persona tumbada a 2.4GHz (izquierda) y 868MHz (derecha)

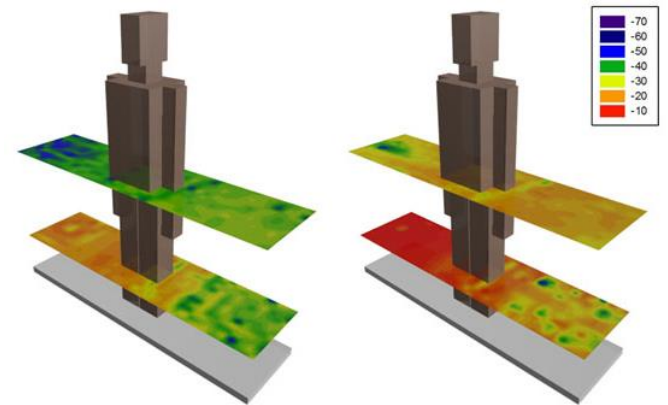


Fig. 3. Resultados de simulación con la persona de pie a 2.4GHz (izquierda) y 868MHz (derecha)

En segundo lugar, hay que analizar cómo afecta una superficie acuática a las potencias recibidas. Con este fin, se sustituye el suelo de hormigón del escenario por uno de agua, más específicamente, de agua salada a una temperatura de 20°C y con un nivel de salinidad medio. En la Fig. 4 se aprecia esta comparativa entre superficie de agua y de hormigón, para una frecuencia de transmisión de 2.4GHz y en donde la persona está de pie. De este modo queda demostrado, gracias a los niveles de potencia inferiores

recibidos (en dBm), que el agua es un medio más absorbente que el hormigón para las señales de alta frecuencia.

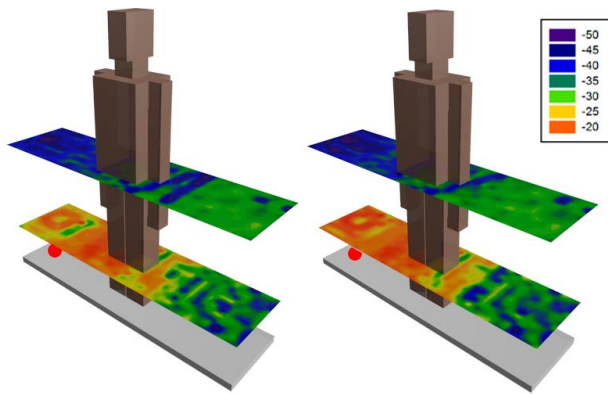


Fig. 4. Resultados de simulación considerando que la tabla está sobre una superficie de agua (izquierda) y de hormigón (derecha)

III. MEDIDAS EMPÍRICAS

En este estudio se han efectuado dos tipos de medidas. Por un lado, se han hecho medidas RSSI (Received Signal Strength Indicator) o de potencia recibida, con objeto de validar por comparación el código de trazado de rayos, y por el otro, se han hecho medidas PER (Packet Error Rate) para comprobar la calidad de la transmisión en un enlace de esas características.

A. Resultados RSSI

Para acometer estas medidas, se ha empleado en el lado del transmisor un dipolo a la frecuencia deseada, 2.4GHz o 868MHz, cuyas ganancias son de 0.82 y 2dBi, respectivamente. Este ha sido conectado a un generador de señal Marconi 2041, configurado para transmitir un pulso a la frecuencia pertinente con una potencia de 10dBm. Por otro lado, el sistema receptor se ha creado a partir de una antena similar a la anterior conectada a un analizador de espectros Agilent FieldFox N9912A.

La antena transmisora se ha fijado sobre la tabla, en el mismo lugar que para las simulaciones, mientras que a la receptora se le ha dotado de cierta movilidad para variar su posición conforme al plan de medidas que aparece en la Fig. 5. En él se han establecido tres radiales equidistantes, con puntos uniformemente distribuidos a lo largo de la tabla cada 0.25m, donde se ha situado el receptor.

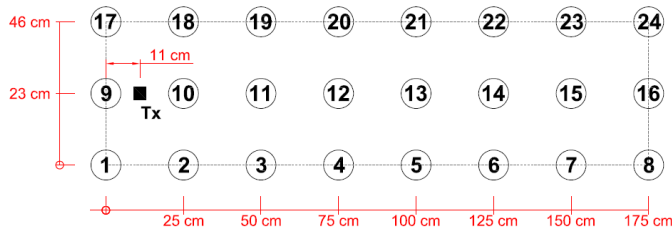


Fig. 5. Puntos de medida donde se ubica el receptor

En la Fig. 6 se observan los resultados obtenidos para el plano situado a 0.3m sobre la tabla cuando la persona está tumbada en ella.

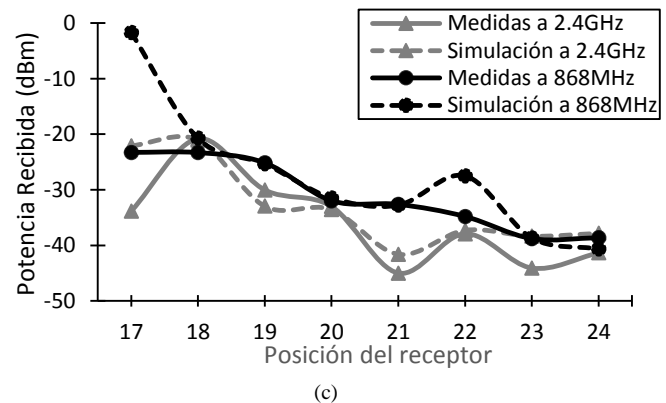
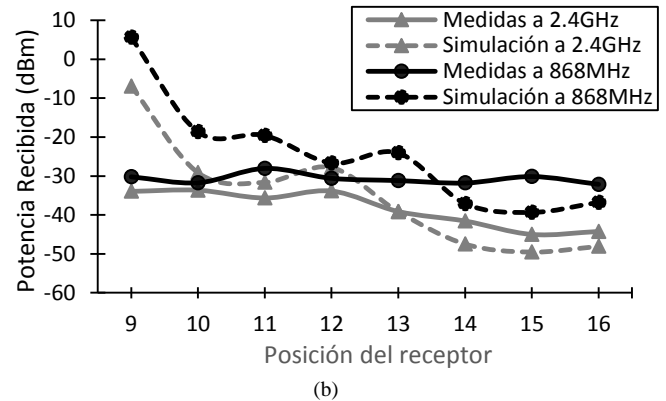
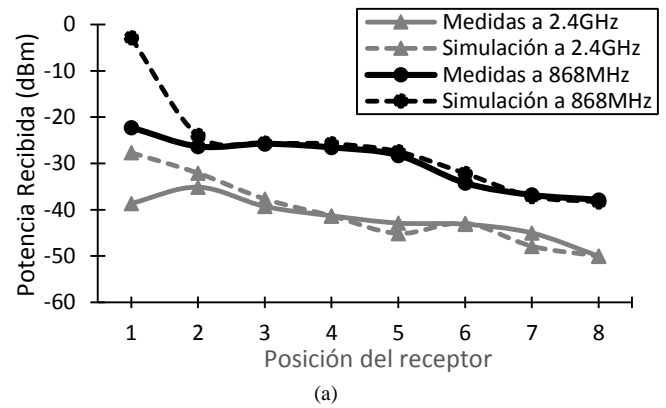


Fig. 6. Comparación entre los valores de potencia medidos y los simulados para la primera (a), segunda (b) y tercera radial (c)

Como se puede comprobar, existe una clara convergencia entre los valores de potencia medidos y los obtenidos de las simulaciones. Por lo tanto se puede deducir que el software de lanzamiento de rayos ofrece una muy buena aproximación y queda completamente validado para entornos de este tipo y para distancias entre transmisor y receptor pequeñas.

B. Resultados PER

En este caso se han empleado dos motas Zigbee, cada una de las cuales, dispone de un módulo Xbee Pro S1. Estas han sido conectadas a sendos ordenadores portátiles, en los que se ejecuta un software implementado en Java para permitir la transmisión o recepción de información, y el procesamiento de los datos.

Partiendo de que la primera medida se realiza juntando transmisor y receptor, a modo de referencia, para el resto se ha situado la mota transmisora sobre la tabla, y la receptora en los lugares más típicos en los que una persona podría

llevar dispositivos electrónicos, como muestra la Fig. 7. La comunicación se ha configurado para que se produzca el envío de 10000 paquetes a una velocidad de 9600kbps, utilizando una potencia de transmisión de 18dBm y una frecuencia de 2.4GHz, siendo la ganancia de las antenas de 2dBi.

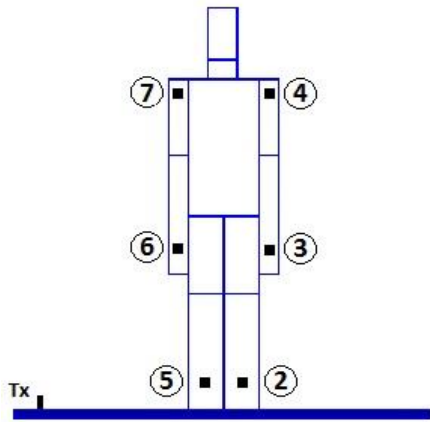


Fig. 7. Puntos de medida donde se coloca el dispositivo Zigbee receptor

La Fig. 8 representa para cada posición del receptor, el porcentaje de paquetes perdidos cuando la persona está de pie encima de la tabla.

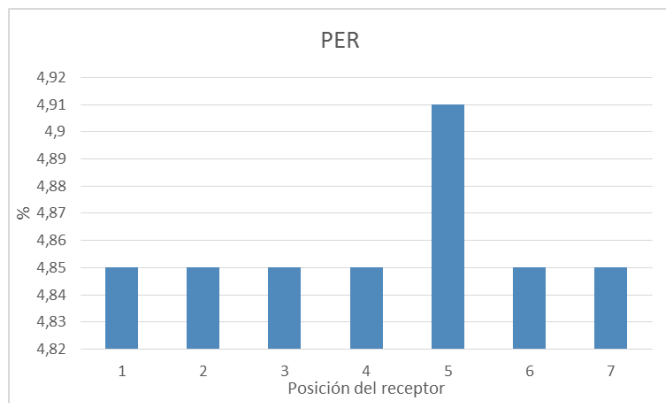


Fig. 8. Medidas PER obtenidas

Al comparar cada uno de los resultados obtenidos con la primera posición, que es el mejor de los casos, se puede observar que apenas hay pérdida de información, aun aumentando el valor de la posición 5 debido a la despolarización entre las antenas transmisora y receptora. También hay que añadir que el hecho de que el mejor valor de PER que puede ser obtenido no sea inferior al 4.85% se debe a la propia electrónica de los dispositivos y no al canal radioeléctrico.

En definitiva, este sistema de comunicaciones entre la tabla de surf y la persona ofrece una muy buena calidad de transmisión y se concluye que efectivamente un sistema de estas características es totalmente viable.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado la caracterización del canal radioeléctrico para un entorno exterior complejo, con la finalidad de fundamentar el desarrollo de aplicaciones que integren sistemas de comunicaciones inalámbricos en una actividad deportiva como el surf. Para ello se ha contado con los datos adquiridos en las medidas experimentales y a través de las simulaciones. De este modo, se ha confirmado la

eficacia del modelo de lanzamiento de rayos en 3D en un contexto de este tipo, que ha proporcionado unos resultados óptimos con un coste computacional bajo, en comparación con otros métodos existentes.

También se ha demostrado que elementos como el medio acuático o el cuerpo humano son una fuente de componentes multitrayecto que perjudican altamente la transmisión y pueden poner en entredicho el buen funcionamiento del sistema dependiendo de sus características. Haciendo de esta manera que cobre mayor importancia una buena elección de la frecuencia de operación y de la posición del receptor.

Finalmente hay que resaltar que, pese a todas las dificultades que introduce el ambiente que rodea al surf, los valores de potencia recibida están muy por encima de las sensibilidades facilitadas por los receptores comerciales actuales, dando lugar a un amplio margen de seguridad que imposibilita futuros desvanecimientos o pérdidas de información, aumentando la calidad de la comunicación y dando la posibilidad de implementar sistemas de comunicación tabla-persona siempre que se garantice la estanqueidad de los sistemas electrónicos.

REFERENCIAS

- [1] S. Sendra, J. V. Lamparero, J. Lloret and M. Ardid, "Underwater Communications in Wireless Sensor Networks using WLAN at 2.4 GHz" in *Proceeding of The 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, 2011.
- [2] S. Sendra, J. Lloret, J. J. P. C. Rodrigues, and J. M. Aguiar, "Underwater Wireless Communications in Freshwater at 2.4 GHz", *IEEE Communications Letters*, Vol. 17, No. 9, pp. 1794-1797, September 2013.
- [3] A. A. Abdou, A. Shaw, A. Mason, A. Al-Shamma'a, J. Cullen and S. Wylie, "Electromagnetic (EM) wave propagation for the development of an Underwater Wireless Sensor Network (WSN)", *IEEE Sensors*, pp. 1571-1574, 2011.
- [4] M. Jiang, Z. Guo, F. Hong, Y. Ma and H. Luo, "OceanSense: A Practical Wireless Sensor Network on the Surface of the Sea" in *Proceeding of The IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2009.
- [5] D. A. James, A. Galehar and D. V. Thiel, "Mobile sensor communications in aquatic environments for sporting applications" in *Proceeding of The 8th Conference of the International Sports Engineering Association*, 2010.
- [6] M. Gong, L. Zhang, Z. Ding, F. Dong and L. Wang, "Research and Development of Swimming Training Information System Based on ZigBee Technology" in *Proceeding of The International Conference on Systems and Informatics*, 2012.
- [7] D. D. Bona, G. S. Ferreira and L. Schwarz, "Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surfe utilizando Tecnologia ZigBee" in *Proceeding of The 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [8] F. D. Hastings, J. B. Schneider, S. L. Broschat and E. I. Thorsos, "An FDTD Method for Analysis of Scattering from Rough Fluid-Fluid Interfaces", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 94-101, January 2001.
- [9] J. C. West and Z. Zhao, "Electromagnetic Modeling of Multipath Scattering From Breaking Water Waves With Rough Faces", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 40, No. 3, pp. 583-592, March 2002.
- [10] M. Zhu, X. Zhao and Y. Zhang, "Study on a Sea Radio-wave Propagation Loss Model" in *Proceeding of The International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2010.
- [11] J. A. Nazábal, P. L. Iturri, L. Azpilicueta, F. Falcone, C. Fernández-Valdivielso, "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Compliant Wireless Devices for Heterogeneous Indoor Home Automation Environments," *International Journal of Antennas and Propagation*, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 176383, 2012.
- [12] E. Aguirre, J. Arpón, L. Azpilicueta, S. de Miguel, V. Ramos and F. Falcone, "Evaluation of electromagnetic dosimetry of wireless systems in complex indoor scenarios within body human interaction," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 43, pp. 189-209.

Characterization of UHF Radio Channels for Wireless Sensor Systems Embedded in Surfboards

H. Baghdadi, E. Aguirre, P. López, L. Azpilicueta, J. J. Astrain, J. Villadangos, F. Falcone, *Senior Member, IEEE*

Abstract—In this paper, the radio propagation for wireless systems embedded in surfboards has been characterized with the aim of testing the quality of a person to surfboard communication and person to infrastructure in aquatic environments, by means of Wireless Body Area Networks combined with an adequate transport technology. Wireless channel performance has been analyzed with the aid of an in house developed 3D Ray Launching Method and validated by empirical measurements, showing good agreement with differences below 3dB, showing the influence of multipath components generated in this context as well as the strong influence of the average height of sea waves, which has been introduced within the deterministic algorithm employed. The adoption of precise radioplanning techniques can aid in the deployment of efficient and cost effective new wireless solutions and optimal antenna location, applied to surfing and extendable to other aquatic sports and applications.

Index Terms—WPAN, WSN, surfboard, 3D Ray Launching, aquatic environment, sea surface roughness.

I. INTRODUCTION

The evolution of the wireless technologies and microelectronic has totally changed the way in which telecommunications are understood nowadays, producing smaller and more wearable devices at lower prices that provides new kinds of communications. Sports have taken advantage of this evolution, using the information provided by these networks for enhanced event development.

Motor-sports have been early adopters of wireless technologies, implementing car parameters wireless telemetry [1, 2], although other sport disciplines are making use of wireless monitoring systems [3]-[5]. These technologies are usually based on 802.15 protocol and specifically Wireless Personal Area Networks (WPAN), in which energy efficiency and small size of Zigbee, Bluetooth or RFID based transceivers offer a wide range of possibilities in terms of

wearable applications. In aquatic environments, researchers have deployed wireless sensor networks above the sea [6]-[8], obtaining environmental monitoring data, and under the sea level developing long distance underwater communications system by using low frequencies [9],[10].

More specifically, in the case of surfing, an accelerometer could capture the human body movements and save this information in the surfboard or send it using a wireless link providing real time information to the spectators and sport judges, in the case of competitions. However, the existence of water surrounding the surfboard must be taken into account in the system analysis, with phenomena such as diffraction, diffuse scattering associated to the rough sea surface and attenuation caused by water absorption taking place. Consequently many multipath and scattered components can reach the receiver, degrading system operation [11]-[13]. Despite not being a commonly studied topic, in [14] a surfboard full integrated sensor network is presented, enabling sending information of mechanical stress of the board during the activity. One of the main challenges is the estimation of radio propagation losses in a complex environment, such as a realistic aquatic one. Empirical based estimations require large measurement sets, obtaining site specific regressive models. On the other hand, full wave simulation tools render precise estimations with large computational complexity. Deterministic based methods such as Ray Launching and Ray Tracing can provide adequate tradeoff between precision and computational complexity, particularly for large scenarios.

In this work, the radio channel characterization of a wireless communication system between a surfboard and a person is evaluated, with the aid of an in-house developed 3D Ray Launching Method (3D RLM), in which a surfboard and a simplified human body model have been implemented. Moreover, in order to consider specifically the case of surfing, water roughness has also been introduced and coupled to the 3D RLM. Measurement results in a test lab environment are obtained in order to validate simulation estimations, in the 2.4GHz and 868MHz bands, widely used in wireless personal and body area networks devices. Initially, wireless characterization by means of deterministic simulation is validated in a compact environment, further extended for the case of operation in an open aquatic environment, in which the surfer can establish communication with infrastructure

Hisham Baghdadi, Erik Aguirre, Peio Lopez, Leire Azpilicueta and Francisco Falcone are with the Electrical and Electronic Engineering Department, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Navarra, Spain.

José Javier Astrain and Jesús Villadangos are with the Mathematical Engineering and Computer Science Department, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Navarra, Spain.

(phone: +34-948-169741; fax: +34-948-160720; e-mail: francisco.falcone@unavarra.es).

elements, such as a buoy.

The rest of the paper is structured as follows. Section II describes both the 3D RLM technique and the simulation scenario, while Section III presents and analyzes the simulation results obtained, as well as the extension to a potential outdoor aquatic scenario. Section IV presents the measurement setup and results.

II. RAY LAUNCHING TECHNIQUE AND SIMULATION SCENARIO

The behavior of the radio channel in a surfboard to person communication link as well as in a surfboard to infrastructure scenario has been analyzed by means of an in-house 3D Ray Launching algorithm. This code implemented in Matlab and developed in the Public University of Navarre, is a deterministic technique based on launching rays from the transmitter with a discrete angle increment within a defined solid angle. Each ray is computed individually and takes into account the loss tangent and dielectric constant of all materials inside the scenario to estimate the typical interactions as reflections, refractions and first order diffractions. This method has been widely proved in several works where the ray launching technique and the human body model, also implemented in house [15] is used. The simulation parameters employed are shown in Table I.

TABLE I
SIMULATION PARAMETERS

Frequency	2.4GHz	868MHz
Transmitter power	10dBm	
Antenna Gain	0.82dBi	2dBi
Horizontal plane angle resolution ($\Delta\Phi$)	1°	
Vertical plane angle resolution ($\Delta\theta$)	1°	
Reflections	6	
Resolution	5cm x 5cm x 5cm	

Initially, a test scenario is simulated in order to validate the surfboard model and the human body model (resembling the potential surfer) within the 3D RLM code, verified with measurement results in the laboratory, which will be shown in the next section. To minimize the influence of walls in the received power estimations and therefore, to obtain reliable results, a wide scenario (8m x 8m x 4m) has been defined where one person is placed over a surfboard (Fig.1). The surfboard has been modeled as a rectangular polystyrene board, having a size of 1.75m x 0.46m x 0.05m, and which includes a wireless transmitter at 0.11m from the left edge, with a radiation pattern corresponding to a short vertical monopole, being the maximum directivity in the horizontal plane.

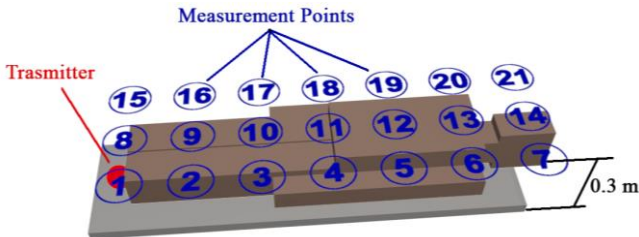


Fig. 1. Model used in the ray launching code and RSSI measurement points.

III. SIMULATION RESULTS

Once the scenario has been implemented, simulation results have been obtained for two different heights of 0.3 and 0.9m from the surfboard, considering two typical surfer positions, the person laying (Fig. 2) and standing (Fig. 3). The estimation of received power level distribution results are presented for 2.4GHz and 868MHz frequencies, which represent the spectral allocation for a wide range of WSN deployments in different regions of the world.

The results show that received power values depend on the distance to emitter, decreasing if the distance is greater, and improving when the frequency is reduced. Furthermore, outcomes are much better when the person is standing than lying, because the inclusion of a human body in the channel introduces an element with a high absorption coefficient that attenuate signals quickly.

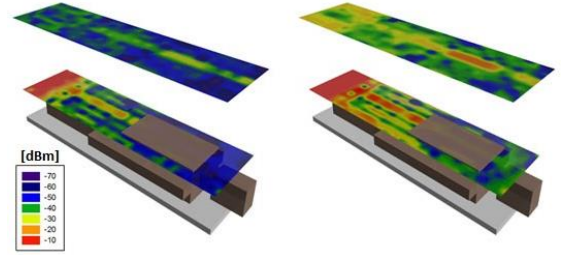


Fig. 2. Simulation results of Received Signal Level in dBm at 2.4GHz (left) and 868MHz (right) when the person is lying.

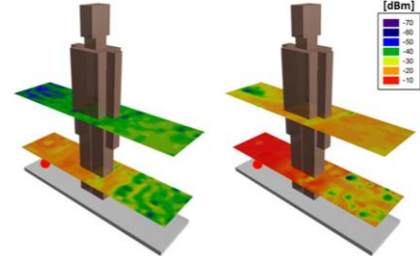


Fig. 3. Simulation results of Received Signal Level in dBm at 2.4GHz (left) and 868MHz (right) when the person is standing. Red point is the transmitter.

Further simulation results have been obtained in order to analyze parameters such as material changes. In this case, Fig. 4 shows the differences between the surfboard placed on water and on a cement floor (employed as a measurement validation test) when the person is standing on it, for an operating frequency of 2.4GHz in this case. This latter configuration is employed in order to validate the simulation methodology, which is easily measurable in a laboratory environment.

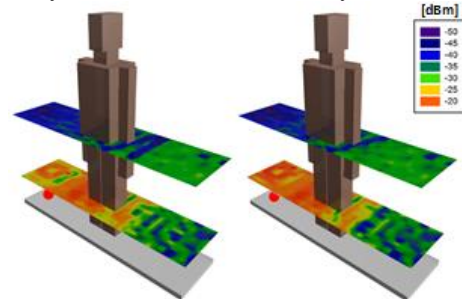


Fig. 4. Power levels in dBm, considering that the surfboard is on water (left) and on concrete (right) with an emitting antenna in the back side (red point).

Another element analyzed is the impact of modification of water properties in the radio propagation, which is depicted in

Fig. 5, considering freshwater versus seawater at 20°C of temperature and medium salinity, following the schematic depicted in Fig. 1. As it can be seen, there are no significant differences for a height of 0.3m at 2.4GHz and with surfer standing on the surfboard.

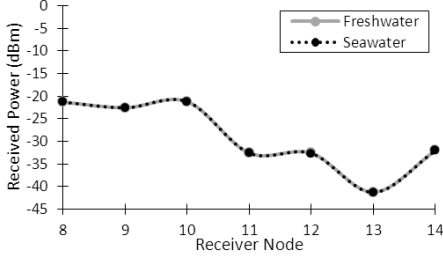


Fig. 5. Simulation results depending on water properties.

Furthermore, in order to emulate a true open aquatic environment, sea surface roughness has been included in a larger scenario (with dimensions of 50m x 20m x 10m), considering a potential wireless communication link between the surfer and a receiver on a buoy located at a distance of 42m. To simplify the simulation code, this buoy is modeled as a rectangular prism with a size of 1.5m x 1.5m x 2m, although other potential geometries can be implemented.

It is generally considered the sea surface is smooth and only produces specular reflection, if Rayleigh criterion (1) is satisfied.

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad (1)$$

Where σ_h is the standard deviation of sea wave height, λ is the wavelength of the incident ray and θ_i is the incident angle. Otherwise the surface will be rough, causing diffuse scattering and resulting in a power reduction of the specular reflected ray. To estimate the scattered power, the Kirchhoff theory proposes an effective reflection coefficient (R_{rough}) which is function of σ_h and θ_i , besides the specular reflection coefficient (R) [16][17].

$$R_{\text{rough}} = R \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i \right) \right)^2 \right] \quad (2)$$

Ocean wave behavior depends mainly on the wind speed (U). Several works, e.g. [18], have shown this relationship by means of the significant wave height ($H_{1/3}$). As well, $H_{1/3}$ can be defined as a function of σ_h

$$H_{1/3} = 0.0214U^2 \quad (3)$$

$$H_{1/3} = 4\sigma_h \quad (4)$$

Simulation results for a transceiver operating at 2.4GHz, transmit power of 10dBm and a spatial simulation mesh resolution of 1m³, are shown in Fig. 6, where the comparison between a smooth and a rough surface with different degrees of surface roughness due to sea waves is observed. It should be noted that, in the buoy, the received power decreases approximately 1dB when $\sigma_h=0.3\text{m}$ regarding the case of a smooth surface ($\sigma_h=0\text{m}$). The power distribution in the XY plane for a sea surface roughness of $\sigma_h=0.3\text{m}$ and at a height of 1.5m over the surface of the sea is depicted in Fig. 7, in which the transceiver is embedded in the surfboard.

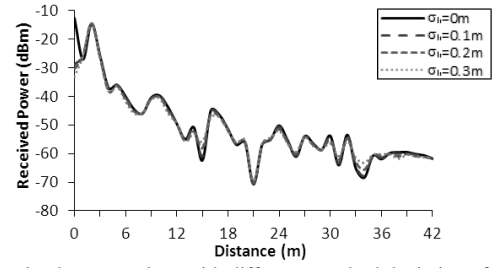


Fig. 6. Received power values with different standard deviation of wave height.

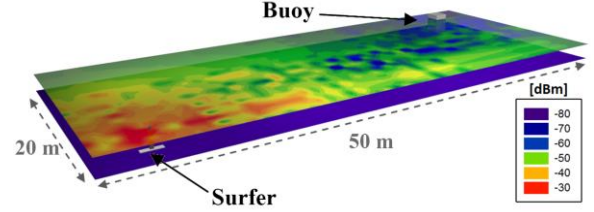


Fig. 7. Simulation results at 2.4GHz considering the rough sea surface with the surfer is on the lower left side and the buoy is in the top right corner.

In order to analyze the influence due to sea height variation in received power distribution, the results for two different wave height variation values are depicted for the previous scenario in Fig. 8. As it can be seen, when higher values of σ_h are considered, most multipath components are cancelled due to absorption or scattering, with an overall path loss given mainly by exponential distance loss.

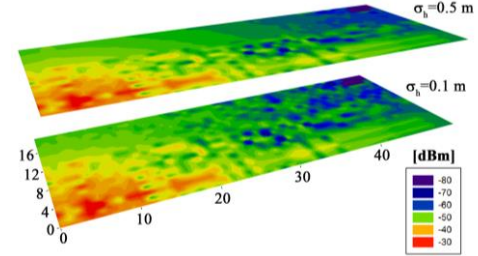


Fig. 8. Simulation results at 2.4GHz considering the rough sea surface for two different wave height variation values.

IV. MEASUREMENT RESULTS

In order to validate simulation results previously calculated, Received Signal Strength Indicator (RSSI) measurement results have been obtained. The experimental setup is composed by a Marconi 2041 signal generator, an Agilent FieldFox N9912A spectrum analyzer and corresponding short vertical monopoles, configured to emit signals for 2.4GHz or 868MHz frequencies with maximum transmit power of 10dBm. The transmitter is fixed on the surfboard and the position of the receiver is scanned 0.25m in three equally spaced rows along the surfboard, at the heights of 0.3 and 0.9m, schematically shown in Fig. 1.

The measurement as well as simulation results obtained for a potential receiver height of 0.3m over the surfboard when the position of the person is lying on it are presented in Fig. 8, showing good agreement, with a mean error value of 2.65dBm and a standard deviation of 2.85dBm.

In order to provide more insight in the operation of the potential WBAN/WPAN network, communication quality has been analyzed by obtaining Packet Error Rate (PER) values of wireless links. For this purpose two XBee Pro S1 modules

have been employed, one of them located on the surfboard and the other in several locations of the human body. Every XBee mote is connected to a laptop running specific Java programs implemented in house to send or receive data and generate PER statistics. The link parameters are set up to transmit batches of 10000 packets at 9600kbps with a power of 18dBm, operating at 2.4GHz and employing short vertical monopoles with a gain of approximately 2dBi. The results obtained in all cases are below 0.1% of error, given the fact that XBee modules exhibit receiver sensitivity thresholds of -80 dBm in the most restrictive case. The employed method can be further extended to obtain quality assessment of wireless links in the case of surfboard or surfer communications towards infrastructure elements, such as buoys or base stations located at the shore.

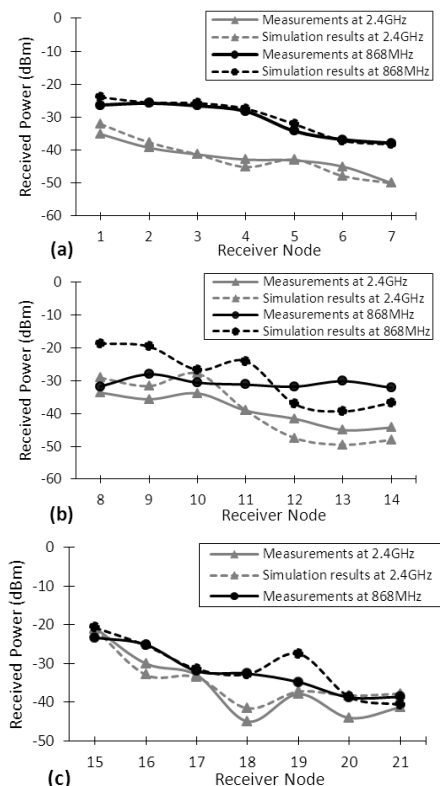


Fig. 8. Received signal strength for the first (a), second (b) and third row (c).

V. CONCLUSIONS

In this work, the characterization of wireless links in the practice of surf for several situations has been presented. Estimations of received power levels have been obtained with the aid of an in house implemented 3D Ray Launching code, in which a specific surfboard component as well as a simplified human body model have been generated. Moreover, consideration of dispersive properties of water (conductivity and dielectric constant) as well as water roughness is taken into account. In the latter case, water surface roughness is coupled to the 3D RLM code, calculating the equivalent reflection coefficient as a function of average height variations for each ray launched incident on the water surface. Simulation as well as measurement results have been obtained in a test configuration for several surfboard/surfer position and potential receiver locations, showing good agreement. Once

the implemented surfboard and surfer models have been tested, a larger scenario resembling an outdoor aquatic surf location with potential connectivity with an infrastructure element (i.e., marine buoy) has been implemented and simulated for different values of water surface roughness. Bi-dimensional received power plots have been obtained, indicating potential coverage levels, which can be employed in radioplanning tasks. The proposed methodology, combining surfboard, surfer and water roughness provides an adequate tool for the estimation of quality assurance parameters in terms of the optimal radioplanning configuration in terms of transceiver location in the particular case of outdoor aquatic environments.

REFERENCES

- [1] J.A. Cottle, R. A. Edmunds, T. D. Morris, S. Robson, K.W. Ross and J. Benedikt, "Exploiting the synergetic relationship between automobiles and wireless communications," in *Proc. of the 3rd IET Conference on Automotive Electronics*, pp. 1-9, Jun. 2007.
- [2] L. Cocco and P. Daponte, "Metrology and formula one car," in *Proc. of the IEEE IMTC*, pp. 755-760, May 2008.
- [3] P. Wilhelm, E. Monier, P. Thomas and U. Ruckert, "SPA – A system for analysis of indoor team sports using video tracking and wireless sensor network," in *Proc. of the 6th ISPA*, pp. 237-241 Sep. 2009.
- [4] N. S. A. Zulkifli, F. K. C. Harun and N. S. Azahar, "XBee wireless sensor networks for heart rate monitoring in sport training," in *Proc. of the ICObE*, pp. 441-444, Feb. 2012.
- [5] M. Hedley and J. Zhang, "Accurate wireless localization in sports," *Computer*, vol. 45, no. 10, pp. 64-70, Oct. 2012.
- [6] M. Jiang, Z. Guo, F. Hong, Y. Ma and H. Luo, "OceanSense: A practical wireless sensor network on the surface of the sea," in *Proc. of the IEEE PerCom*, Galveston, USA, 2009.
- [7] D. A. James, A. Galehar and D. V. Thiel, "Mobile sensor communications in aquatic environments for sporting applications," in *Proc. of the 8th Conference of the ISEA*, 2010.
- [8] M. Gong, L. Zhang, Z. Ding, F. Dong and L. Wang, "Research and development of swimming training information system based on zigbee technology," in *Proc. of The ICSAI*, 2012.
- [9] S. Sendra, J. V. Lamparero, J. Lloret and M. Ardid, "Underwater communications in wireless sensor networks using WLAN at 2.4 GHz," in *Proc. of the 8th IEEE MASS*, 2011.
- [10] S. Sendra, J. Lloret, J. J. P. C. Rodrigues and J. M. Aguiar, "Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1794-1797, Sep. 2013.
- [11] F. D. Hastings, J. B. Schneider, S. L. Broschat and E. I. Thorsos, "An FDTD method for analysis of scattering from rough fluid-fluid interfaces," *IEEE JOE*, vol. 26, no. 1, pp. 94-101, Jan. 2001.
- [12] J. C. West and Z. Zhao, "Electromagnetic modeling of multipath scattering from breaking water waves with rough faces," *IEEE TGRS*, vol. 40, no. 3, pp. 583-592, Mar. 2002.
- [13] M. Zhu, X. Zhao and Y. Zhang, "Study on a sea radio-wave propagation loss model," in *Proc. of the International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2010.
- [14] D. D. Bona, G. S. Ferreira and L. Schwarz, "Sensoriamento remoto em pranchas de surfe utilizando tecnologia ZigBee," in *Proc. of the 9th IEEE/IAS INDUSCON*, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [15] E. Aguirre, J. Arpón, L. Azpilicueta, S. de Miguel, V. Ramos and F. Falcone, "Evaluation of electromagnetic dosimetry of wireless systems in complex indoor scenarios within body human interaction," *PIER B*, vol. 43, pp. 189-209.
- [16] K. Yang, A. F. Molisch, T. Ekman, and T. Røste, "A deterministic round earth loss model for open-sea radio propagation," in *Proc. of the 77th IEEE VTC Spring*, Dresden, Germany, 2013.
- [17] M. Schulkin, "Sea surface loss in surface ducts and shallow water: A historical perspective," in *Proc. of the IEEE Oceans Conference*, Washington DC, USA, 1986.
- [18] Y. Ding, J. Sun and X. Wang, "Sea surface reflection and power attenuation analysis of radio wave in UHF satellite communications," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no.4, pp. 3168-3176, April 2014.